



UNIVERSIDADE FEDERAL DE ENGENHARIA DE ITAJUBÁ
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
AUTOMAÇÃO E CONTROLE INDUSTRIAL

RICARDO SEBASTIÃO NADUR MOTTA

AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE
SISTEMAS DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO
EM ALTOS-FORNOS

DATA: 25/11/2011

Itajubá (MG)
2011

RICARDO SEBASTIÃO NADUR MOTTA

AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE
SISTEMAS DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO
EM ALTOS-FORNOS

Tese apresentada à Universidade Federal
de Itajubá (UNIFEI) para obtenção do
título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de concentração:
Controle e Automação de Processos
Industriais

Orientador: Prof. Dr. Luiz Edival de Souza

ITAJUBÁ - BRASIL
2011

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Cristiane N. C. Carpinteiro- CRB_6/1702

M921a

Motta, Ricardo Sebastião Nadur

Automação e controle de sistemas de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos / por Ricardo Sebastião Nadur Motta. -- Itajubá (MG) : [s.n.], 2011.

242 p. : il.

Orientador : Prof. Dr. Luiz Edival de Souza.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Itajubá

1. Alto-forno. 2. Injeção de carvão. 3. Automação e controle. 4. Vazão de carvão. I. Souza, Luiz Edival de, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho às equipes de profissionais da CSN e UNIFEI.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Ilanez Pereira por conceder a oportunidade única em minha vida para acompanhar o projeto do Sistema de Injeção de Carvão Pulverizado - PCI da CSN desde seu início e a Carlos Hilton Zanetti pela confiança depositada como profissional e por ter sido um bom gerente durante todos os anos de meu trabalho dedicado ao PCI e altos fornos sem nunca negar os recursos necessários a manutenção das máquinas e ao desenvolvimento dos processos.

Agradeço a Fabian Franklin por compreender, prover recursos e conceder a honra e liberdade e a confiança da mudança nos processos. Ao diretor da CSN, Enéas Garcia Diniz, pelos resultados alcançados nesta tese e em minha carreira profissional

Agradeço a Rodolfo Baldini Figueira pela ótima supervisão mecânica do PCI e pelas conexões ao processo de instrumentos e construção de projetos mecânicos a meu pedido no PCI. Agradeço a Alcides Silva e Gelson Costa, colegas e responsáveis pelas instalações elétricas de 19 válvulas implementadas nesta tese.

Agradeço a Sebastião Jorge Xavier Noblat, Francisco Nóbrega de Aguiar e especialmente a Valmir Soares de Carvalho por algumas idéias de melhoria do processo, apoio e treinamento na implementação de novas funções operacionais com as equipes de operação.

Agradeço ao Prof. João Roberto Cogo pelos ensinamentos e base científica adquiridos durante a dissertação de mestrado. Agradeço ao Prof. Fernando Tadeu de Medeiros da Universidade Federal Fluminense, especialista em Siderurgia, por participar do trabalho, da banca examinadora e contribuir na formação e sedimentação dos conhecimentos especiais sobre metalurgia desta tese.

Agradeço em especial ao Prof. Luiz Edival de Souza pelo aceite do tema, e especialmente pela orientação e dedicação a esta tese, a lapidação necessária para um documento científico padronizado de acordo com o nível exigido para o Doutorado em Controle de Processos.

À minha família, Sílvio, Simone e Adriana, minha mãe Magali, a minha esposa Sueli e ao meu filho Daniel, meus agradecimentos por suportarem a minha ausência nesta difícil jornada de trabalho e desenvolvimento que exige dedicação, criatividade e, sobretudo anos de trabalho, resultando neste documento científico.

“Uma tese de doutorado é o resultado de muito trabalho e aplicação,
na solução de problemas nunca antes encontrados”

Ricardo Sebastião Nadur Motta

RESUMO

Este trabalho é resultado do desenvolvimento da instrumentação, automação e controle do Sistema de Injeção de Carvão Pulverizado (PCI) da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) em Volta Redonda (RJ) Brasil com o objetivo de minimizar todos os tipos de variação da vazão de carvão pulverizado para produzir ferro-gusa com baixo desvio padrão de silício e enxofre, otimizar o processo e reduzir o consumo específico de energia elétrica e nitrogênio. Outros objetivos desta tese são o aumento da eficiência energética dos processos, a melhoria dos intertravamentos de segurança, a mitigação dos entupimentos das lanças de injeção, o aumento da vida útil dos equipamentos e por fim, a diminuição da variabilidade da vazão de carvão pulverizado para o alto-forno visando produzir ferro-gusa com melhor qualidade e menor custo.

Foram empregados novos instrumentos e técnicas para medição e correção da vazão de carvão pulverizado utilizando-se de um sistema digital de controle distribuído para elaboração de modelos e estratégias de controle para se conseguir o menor desvio padrão para todas as variabilidades das vazões de carvão pulverizado. Os modelos das velocidades das partículas de carvão e o diagrama das pressões ao longo das tubulações norteiam o ajuste do transporte pneumático evitando entupimentos no transporte processo e nas lanças de injeção de carvão simples e duplas.

As ações e estratégias de controle adotadas proporcionaram uma maior constância na cinética das reações de combustão permitindo acerto do balanço de energia, maior estabilidade e controle térmico do alto-forno. Os resultados obtidos explicam vários fenômenos que ocorrem na injeção de carvão pulverizado e comprovam a eficácia das ações descritas nesta tese proporcionando estabilidade ao processo e melhor qualidade do ferro-gusa produzido pelo alto-forno.

Palavras-chave: Controle de processos. Injeção de carvão pulverizado. Alto-forno.

ABSTRACT

This work is a result of Pulverized Coal Injection System (PCI) instrumentation, automation and process control development at the Brazilian National Steel Company (CSN), Volta Redonda in Rio de Janeiro State (RJ), Brazil, which the main goal are to minimize all types of coal flow variation, to optimize the process and to reduce the specific consumption of electric energy and nitrogen. The main optimization points for the PCI process and goals of this thesis are to decrease the coal flow variability for the blast furnace, to improve the safety's interlocks process, to mitigate the coal injection lances clogging, to increase of the equipments useful life in general, to increase the process energy efficiency and finally to produce hot metal with better quality and lower costs.

New instruments and techniques were used to measure and correct the pulverized coal flow using a digital control system for elaborate models and control strategies in order to provide smallest standard deviation for all the coal flow variability in a PCI system. The models for pulverized coal particles speed and the pressures diagrams along the stepped conveyor pipeline guides the pneumatic conveyor adjustments to avoid blockages and clogging in the solid conveyor process at single and double coal injection lances.

The action and control strategies adopted provided a better constance in the combustion kinetics reactions allowing success of the swinging of energy, better stability and thermal control of the blast furnace. The obtained results explain several phenomenon that happen in the pulverized coal injection process and they check the effectiveness of the actions described in this thesis providing stability to the process and better quality of the hot metal produced by the blast furnace.

Keywords: Pulverized coal injection. Blast furnace. Automation and control. Coal flow.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema de injeção de carvão pulverizado.....	2
Figura 1.2 - Diagrama simplificado do sistema de carvão pulverizado contendo as estações de injeção objeto da tese, funcionando atualmente na CSN	3
Figura 1.3 - Alto-forno 3 e PCI da CSN	4
Figura 1.4 - Influência da variabilidade da vazão de carvão pulverizado em sua queima.....	6
Figura 1.5 - Influência da variação da injeção na produção do alto-forno	7
Figura 1.6 - Objetivos complementares da tese	10
Figura 1.7 - Conseqüências da variabilidade da vazão de carvão pulverizado.....	11
Figura 1.8 - Organização da tese	12
Figura 2.1 - Injeção de carvão pulverizado para altos-fornos.....	16
Figura 2.2 - Sistema de injeção de carvão pulverizado.....	16
Figura 2.3 - Visão geral do PCI da CSN para os Altos-fornos 2 e 3.....	17
Figura 2.4 - Gerador de gás quente para secagem do carvão	18
Figura 2.5 - Moagem de carvão pulverizado	18
Figura 2.6 - Distribuidor estático de carvão pulverizado para altos-fornos.....	20
Figura 2.7 - Tela de operação do distribuidor estático de carvão.....	20
Figura 2.8 - Típico transporte pneumático de carvão	21
Figura 2.9 - Transporte pneumático em fase diluída	22
Figura 2.10 - Transporte pneumático fase diluída	25
Figura 2.11 - Transporte pneumático fase densa com fluidização	25
Figura 2.12 - Diagrama de estado para transporte pneumático	26
Figura 2.13 - Distribuidor estático de finos de carvão	27
Figura 2.14 - Controle de vazão de carvão global com medição baseada em células de carga	28
Figura 2.15 - Controle de vazão de carvão global com medidor na linha principal ...	28
Figura 2.16 - Controle de vazão de carvão individual baseado em célula de carga geral	29
Figura 2.17 - Controle de vazão de carvão individual com medição por lança.....	30

Figura 2.18 - Visão em corte da estação de injeção	32
Figura 2.19 - Projeto original Claudius Peters para a CSN	33
Figura 2.20 - Processo de transporte pneumático da estação de injeção do AF2	34
Figura 2.21 - Vasos de injeção 1 e 2 do AF2	36
Figura 2.22 - Válvula de alívio do vaso 4 do Alto-forno 3	37
Figura 2.23 - Válvula prato do vaso 4 do AF3	37
Figura 2.24 - Válvula dosadora de carvão pulverizado do vaso do AF3	38
Figura 2.25 - Malhas de controle da estação de injeção	40
Figura 2.26 - Linha de nitrogênio de arraste de carvão pulverizado.....	41
Figura 2.27 - Anel de fluidização do vaso de injeção de carvão pulverizado	42
Figura 3.1 - Tipos de variação de injeção de carvão.....	45
Figura 3.2 - Variação percentual instantânea da vazão de carvão.....	50
Figura 3.3 - Histograma de distribuição amostral da vazão de carvão.....	52
Figura 3.4 - Análise da variabilidade da vazão de carvão em tempo real	53
Figura 4.1 - Válvula direcional de duas vias implantada	59
Figura 4.2 - Valores de intertravamentos desenvolvidos.....	67
Figura 4.3 - Tempo de carregamento em função da taxa de injeção	70
Figura 4.4 - Algoritmo de carregamento dos vasos de injeção do AF3.....	72
Figura 4.5 - Algoritmo de retomada rápida após queda da vazão de carvão	76
Figura 4.6 - Monitoração das fases dos ciclos de injeção dos vasos	77
Figura 4.7 - Diagrama isométrico da linha de pré-pressurização	83
Figura 4.8 - Sistema de pré-pressurização dos vasos de injeção	84
Figura 4.9 - Conjunto montado do fluidizador do vaso.....	86
Figura 4.10 - Fluidizador extra.....	87
Figura 4.11 - Modificação no projeto da estação de injeção pela CSN em 2007	89
Figura 4.12 - Projeto da estação de injeção desenvolvido e implantado em 2009....	90
Figura 4.13 - Linearização para o tempo de pressurização rápida.....	91
Figura 4.14 - Pré-pressurização e pressurização rápida	91
Figura 4.15 - Pressão do vaso 1 do AF3 durante a pré-pressurização	93
Figura 5.1 - Avaliação dos entupimentos da estação de injeção AF3.1	98
Figura 5.2 - Programa de análise de falhas nos detectores de carvão das linhas ..	101

Figura 5.3 - Programa de contagem e determinação dos entupimentos das lanças de injeção	102
Figura 5.4 - Programa de contagem dos alarmes de vazão de ar soprados nos tubos retos.....	103
Figura 5.5 - Programa de contagem dos alarmes de intertravamentos das válvulas de carvão.....	104
Figura 5.6 - Transmissor de vazão do tubo reto operando normal e em alarme.....	105
Figura 5.7 - Lógica original da Claudius Peters.....	107
Figura 5.8 - Alarme de variação da vazão no tempo.....	109
Figura 5.9 - Oscilações da válvula de carvão com e sem o “Flip-Flop”	110
Figura 5.10 - Intertravamento de vazão e tabela de funcionamento do Flip-Flop....	110
Figura 5.11 - Operação das linhas de carvão do Alto-forno 2	112
Figura 5.12 - Tela gráfica desenvolvida para operação da lança dupla de carvão do AF2.....	115
Figura 6.1 - Sistema de pesagem do vaso de injeção de carvão pulverizado.....	116
Figura 6.2 - Diagrama de obtenção do valor de vazão por células de carga	117
Figura 6.3.a - Início da fase de injeção	118
Figura 6.3.b - Final da fase de injeção	118
Figura 6.4 - Integração dos valores injetados ($k=1,000$)	126
Figura 6.5 - - Integração dos valores carregados no vaso	126
Figura 6.6 - Integração dos valores injetados ($k=0,975$)	128
Figura 6.7 - Integração dos valores carregados	128
Figura 7.1 - Tubo sensor instalado na linha de injeção	132
Figura 7.2 - Diagrama em blocos do sistema de medição desenvolvido.....	133
Figura 7.3 - Fluxograma de funcionamento do cálculo do fator de correção.....	135
Figura 7.4 - Equipamento desenvolvido e suas conexões elétricas	136
Figura 7.5 - Sinal de falha de fluxo de carvão	138
Figura 7.6 - “Off-set” entre as medições de vazão de carvão	139
Figura 7.7 - Tela típica da auto-calibração do AF3.1 visualizada pelo operador.....	140

Figura 8.1 - Desenho esquemático do novo modelo do vaso de injeção	144
Figura 8.2 - Diagrama em blocos do modelo matemático para o transporte pneumático do PCI.....	146
Figura 8.3 - Curva característica das válvulas de controle PCV, FCV2 e FCV3	150
Figura 8.4 - Região de intercessão gerada pelo avanço da válvula dosadora	152
Figura 8.5 - Curva característica da válvula dosadora	153
Figura 8.6 - Imagem térmica do nitrogênio no injetor da linha de transporte principal.....	163
Figura 8.7 - Imagem térmica do fluxo bifásico carvão-nitrogênio na linha de transporte principal.....	163
Figura 8.8 - Transmissor de pressão especial para o transporte pneumático	167
Figura 8.9 - Perfil de pressão ao longo das linhas do transporte pneumático	168
Figura 8.10 - Modelos Dinâmicos do Transporte Pneumático.....	170
Figura 8.11 - Modelo de velocidade para lança de injeção simples (Schedule 160).....	172
Figura 8.12 - Modelo de velocidade para lança de injeção dupla (Schedule XXS).....	173
Figura 8.13 - Diagrama em blocos para verificação dos modelos desenvolvidos	174
Figura 8.14 - Resultados dos modelos do transporte Pneumático do Alto-forno 2.....	175
Figura 8.15 - Resultados dos modelos de velocidade do Transporte pneumático do Alto-forno 2.....	175
Figura 8.16 - Atraso de tempo e amplitude entre o modelos de velocidade e o Densflow	176
Figura 9.1 - Desenho esquemático do novo modelo do vaso de injeção	182
Figura 9.2 - Diagrama em blocos da malha de controle de vazão de fluidização modelada em S.....	183
Figura 9.3 - Diagrama em blocos das malhas de controle de vazão de nitrogênio de transporte.....	183
Figura 9.4 - Diagrama da malha de controle de pressão do vaso	184
Figura 9.5 - Diagrama em S da malha de vazão de carvão	185

Figura 9.6 - União do Modelo dinâmico não-linear como os modelos do transporte pneumático.....	187
Figura 9.7 - Resultados dos modelos de massa e volume para os vasos 1 e 2 de injeção do AF2	189
Figuras 9.8 - Variáveis do Transporte Pneumático e o Balanço Dinâmico de Volume e Massa.....	192
Figura 9.9 - Método para validação dos modelos dinâmicos não-lineares da estação de injeção	196
Figura 10.1 - Controle do “set-point” de injeção (dois modos sem rastreamento)...	202
Figura 10.2 - Controle do “set-point” de injeção (dois modos com rastreamento)...	203
Figura 10.3 - Bloco do instrumento VELLIM do SDCD Yokogawa	204
Figura 10.4 - Tela de operação principal do AF3 e a relação gusa/carga	205
Figura 10.5 - Controle do “set-point” de injeção (três modos com rastreamento) ...	207
Figura 10.6 - Variação do valor de corte do filtro de saturação	214
Figura 10.7 - Variação da posição da válvula dosadora com o peso do vaso de injeção	215
Figura 10.8 - Cálculo inverso da posição ótima de abertura inicial da válvula dosadora	216
Figura 10.9 - Desvio de Injeção Acumulado e as Faixas de Controle	221
Figura 10.10 - Influência do Desvio de Injeção Acumulado no Valor de Set-point de vazão de carvão	222
Figura 10.11 - Valor de Set-point de vazão de carvão retornando ao normal	222
Figura 10.12 - A nova malha de controle de vazão	223
Figura 11.1 - Diagrama em blocos para o controle moderno proposta para a planta PCI	229

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Comparação entre o transporte pneumático em fase densa e diluída ..	22
Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens de PCI com distribuidor estático ou dinâmico	30
Tabela 2.3 - Métodos e malhas de controle fechada para a vazão de carvão pulverizado	31
Tabela 2.4 - Descrição do projeto original das fases da estação de injeção	35
Tabela 2.5 - Resumo das principais fases e a situação de cada válvula	38
Tabela 3.1 - Métodos de controle estático das vazões de carvão pulverizado	47
Tabela 3.2 - Faixas de avaliação da variação de vazão de carvão	51
Tabela 4.1 - Ações tomadas para expandir a capacidade de injeção	58
Tabela 4.2 - Tempos típicos das fases da injeção antes e após a expansão	62
Tabela 4.3 - Ações da estação de injeção em caso de queda de ar soprado ou vazão de transporte	66
Tabela 4.4 - Nomenclatura	80
Tabela 4.5 - Fases da estação de injeção (projeto original + espera)	81
Tabela 4.6 - Descrição das fases atual da estação de injeção	81
Tabela 4.7 - Fases dos vasos de injeção após a pré-pressurização	82
Tabela 5.1 - Valores máximos das variações das vazões	109
Tabela 5.2 - Valores típicos de alarme na CNTP	109
Tabela 6.1 - Resultado comparativo das integrações realizadas	127
Tabela 6.2 - Quadro comparativo entre as técnicas de medição de vazão de carvão	129
Tabela 6.3 - Resultados para diferentes valores de fator de correção k	129
Tabela 7.1 - Comparação entre o sistema de pesagem e o Densflow	140

Tabela 8.1 - Nomenclatura da modelagem do transporte pneumático da estação de carvão pulverizado	145
Tabela 8.2 - Levantamento de dados da linha de transporte pneumático	165
Tabela 9.1 - Nomenclatura da modelagem dinâmica da estação de carvão pulverizado	181
Tabela 10.1 - Exemplificação do cálculo do ritmo de produção do alto-forno	206
Tabela 10.2 - Classificação da grandeza do desvio na vazão de carvão pulverizado.....	209

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AF	Alto-forno
AF2	Alto-forno 2 da CSN
AF3	Alto-forno 3 da CSN
C Pmáx	Capacidade máxima da vazão de carvão
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão
CP	Capacidade nominal de injeção de carvão expressa em t/h
CSN	Companhia Siderúrgica Nacional
CTE	Central termoelétrica
CV	Coeficiente de vazão da válvula
DB	Banda morta do controlador
DV = SV-PV	Desvio atual da vazão de carvão pulverizado
DV	Desvio atual do controlador
EDG	Estação de dessulfuração de gusa em carro torpedo
F	Vazão pela válvula
FCV	Válvula de controle de Vazão
FILO	Memória tipo “First in last out”
FOX	Fábrica de oxigênio
FR	“Fuel rate” ou taxa de combustível para se fabricar 1 t de ferro-gusa
FV	Válvula de fechamento de fluxo ou vazão
G	Quantidade de nitrogênio
GGQ	Gerador de gases quentes
IE	Integral do erro
IEEE	Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos
IOP -	Entrada analógica em aberto
IOP +	Entrada analógica em curto
MIMO	“Multivariable input Multivariable output” - Sistema de Múltiplas entradas e múltiplas saídas
MP	Manutenção Preventiva
MV	Variável manipulada
Pa	Pressão atual do vaso de injeção
Patual	Peso atual do vaso de injeção

PCI	“Pulverized Coal Injection”
PCR	“Pulverized Coal Injection Rate” ou parcela de carvão do FR
PCV	Válvula de controle de Pressão
PI	Controlador Proporcional Integral sem derivativo
PID	Controlador Proporcional Integral derivativo
PI-Hold	Controlador proporcional integral com saída retentiva
PLC	Controlador lógico programável
Pmáx	Peso máximo do vaso de injeção
Pmín	Peso mínimo do vaso de injeção
PV	Valor atual da vazão de carvão medida pelo decréscimo do peso do vaso
q	Quantidade de carvão mais quantidade de nitrogênio em t
S	Quantidade de carvão
SDCD	Sistema Digital de controle Distribuído
SISO	Single Input Single Output
SV	Valor definido de vazão de carvão para o processo
SWR	SWR Engineering - empresa Alemã fabricante do “Densflow”
T	Período de aquisição ou intervalo de tempo entre as amostras
TG	Produção atual de ferro gusa do alto-forno em fluxo em t/h ou t/dia
UNIFEI	Universidade Federal de Engenharia de Itajubá
VEL-	Varição de descida da entrada analógica alta
VEL+	Varição de subida da entrada analógica alta
VELLIM	Bloco limitador de variação de “set-point”
ZI	Transdutor de posição da válvula dosadora

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ	Densidade do fluido bifásico escoado em kg/m^3
μ	Relação adimensional de sólidos/gás ou kgCarvão/kgN_2
ρ_C	Densidade do carvão em kg/m^3
ρ_F	Densidade da mistura bifásica na linha TP
ρ_o	Pressão da CNTP
δ	Desvio padrão da vazão de carvão
$\mu_{\text{máx}}$	Máxima relação adimensional de kgCarvão/kgN_2
ρ_{N_2}	Densidade do nitrogênio na CNTP em kg/m^3
ρ_{NT}	Densidade do nitrogênio na linha de transporte principal em kg/m^3
ρ_{NV}	Densidade do nitrogênio dentro do vaso em kg/m^3
ΔP	Queda de pressão sobre a válvula de controle
ΔP_{FCV2}	Perda de carga através da FCV2
ΔP_L	Queda de pressão na linha principal calculada em bar
ΔP_M	Queda de pressão na linha principal medida em bar
Δt	Intervalo de amostragem do sinal do sistema de pesagem
a	Área da restrição do Venturi, ou da válvula dosadora em m^2
A	Área da seção reta transversal da tubulação de TP em m^2
a_1	Área atual da dosadora do vaso 1 em mm^2
A_1	Área da seção reta transversal da lança Schedule 160 ($d=15,7\text{mm}$)
A_2	Área da seção reta transversal da lança Schedule XXS ($d=11,7\text{mm}$)
b_{45°	Comprimento equivalente das curvas de 45° no TP
b_{90°	Comprimento equivalente da curva de 90° no TP
C	Velocidade das partículas de carvão em m/s
C_C	Calor específico do carvão
C_{MAX}	Vazão máxima de injeção de carvão em t/h
C_{MIN}	Vazão mínima de injeção de carvão em t/h
C_N	Calor específico do nitrogênio
C_{REQU}	Vazão de injeção de carvão solicitada pelo alto-forno em t/h
d	Diâmetro interno da tubulação principal de TP (83mm)
D_F	Densidade de fluxo bifásico na linha TP
$D_F(t)$	Densidade de fluxo na linha principal calculada pelo modelo

D_L	Densidade específica de linha
$D_L(t)$	Densidade específica de linha do TP
$D_s(t)$	Densidade de fluxo na linha principal medida pelo “Densflow”
$DV\%$	Variação percentual do desvio da vazão de carvão
f	Coeficiente de fricção das tubulações principais e ramais ($f=0,005$)
$F(t)$	Vazão de carvão instantânea pelo decréscimo do peso do vaso
$f_{(x)}$	Curva característica da válvula de controle
$F_{N,C}$	Vazão de N_2 através da FCV principal ou válvula dosadora
$F_{N,F}$	Vazão de N_2 através da FCV1 ou válvula de fluidização
$F_{N,L}$	Vazão de N_2 através da linha de TP
$F_{N,P}$	Vazão de N_2 através da PCV ou válvula de controle de pressão
$F_{N,T}$	Vazão de N_2 através da FCV2 ou válvula de transporte
$g(u(t))$	Curva característica da válvula
G'	Vazão mássica de nitrogênio
h	Comprimento total da tubulação de TP na horizontal
k	Fator de multiplicação e correção da vazão de carvão
k_1	Constante de Bernoulli para o vaso 1
L	Comprimento da linha principal de 4”
L_E	Comprimento total equivalente da linha de TP principal de 3 ^{1/2} ”
M	Número de válvulas de carvão abertas
$m(t)$	Massa dinâmica de carvão e nitrogênio no vaso
m_N	Massa de N_2 dentro do vaso
$m_C(t)$	Peso real de carvão dentro do vaso
$m_F(t)$	Vazão mássica de N_2 pela FCV
$m_n(t)$	Peso atual e N_2 do vaso de injeção
$m_P(t)$	Vazão mássica de N_2 pela PCV
$M_s(t)$	Vazão de carvão com faixa de medição
N	Número de vasos interconectados
$n(t)$	Vazão dinâmica de nitrogênio na linha principal em m ³ /h nas CNTPs
N_{45}	Número de curva de 45 ° do TP;
N_{90}	Número de curva de 90 ° do TP;
$p(t)$	Pressão dinâmica do vaso em bar
p_1	Pressão na entrada da restrição, ou pressão a montante
P_1, P_2, \dots, P_n	Pressão do vaso N conectado a rede de nitrogênio de baixa pressão

p_2	Pressão na saída da restrição, ou pressão a jusante
P_{AF}	Pressão de sopro da base do Alto-forno em bar
P_D	Pressão de N_2 de transporte antes do distribuidor obtido por medição de instrumento em bar
P_F	Pressão final de injeção do vaso em bar
P_{FOX}	Pressão da rede de nitrogênio de baixa direta da FOX
P_I	Pressão interna do vaso de injeção
P_{MAX}	Pressão máxima do vaso em bar
P_{MIN}	Pressão mínima do vaso em bar
P_N	Pressão dos tanques de armazenagem de alimentação em bar
P_T	Pressão de N_2 de transporte no injetor obtido por medição de instrumento em bar
P_{tanque}	Pressão dos tanques de Nitrogênio em bar
P_V	Pressão de injeção do vaso em função de C_{REQU}
$q(t)$	Vazão dinâmica de carvão na linha principal em t/h
q	Quantidade de carvão mais quantidade de nitrogênio em kg
Q_1	Integração da vazão de carvão obtida pelo sistema de pesagem (células de carga)
$Q_{1C,L}$	Vazão de carvão após o distribuidor para lança simples em t/h
$Q_{1N,L}$	Vazão mássica de N_2 após o distribuidor para lança simples em t/h;
Q_2	Vazão de carvão obtida pelo algoritmo de pesagem e vazão por bateladas de carregamento do vaso
$Q_{2C,L}$	Vazão de carvão após a bifurcação em Y para lança dupla em t/h
$Q_{2N,L}$	Vazão de N_2 após a bifurcação em Y para lança dupla em t/h;
$q_{C,F}$	Vazão mássica de Carvão pela FCV em t/h
$q_{C,L}$	Vazão mássica de Carvão na linha principal em t/h
$q_{N,F}$	Vazão mássica de N_2 através da FCV1 em kg/h
$q_{N,L}$	Vazão mássica N_2 pela linha principal em kg/h
$q_{N,P}$	Vazão mássica de N_2 através da PCV em kg/h
$q_{N,T}$	Vazão mássica de N_2 através da FCV2 em kg/h
S'	Vazão mássica de carvão
sp.gr.	Gravidade específica
T_A	Intervalo de tempo de alívio do vaso de injeção em s
T_C	Tempo de carregamento em s

T_E	Tempo de espera do vaso oposto
T_F	Temperatura final da mistura em °C
T_{fim}	Tempo previsto para o término da injeção em s
T_I	Tempo de injeção em s
T_{Imin}	Tempo de injeção mínimo quando o tempo de espera do vaso
T_N	Temperatura do N_2 do tanque de alimentação em °C
T_o	Temperatura da CNTP em K (273 K)
T_{op}	Tempo de operação das válvulas
T_P	Tempo de pressurização ou Transporte pneumático
T_{prato}	Tempo para fechar a válvula prato após desligar peneira
T_v	Tempo para esvaziar a peneira
T_x	Vazão de carvão pulverizado em t/h
U_C	Sinal de controle ou variável manipulada para FCV
U_F	Sinal de controle ou variável manipulada para FCV1
$U_F(t)$	Variável manipulada do controlador de vazão de fluidização cujo elemento final de controle é a válvula FCV1
U_P	Sinal de controle ou variável manipulada para PCV
U_T	Sinal de controle ou variável manipulada para FCV2
$U_T(t)$	Variável manipulada do controlador de vazão de transporte cujo elemento final de controle é a válvula FCV2
v	Comprimento total da tubulação de transporte pneumático na vertical
V	Volume interno do vaso ($25m^2$)
V_C	Volume de carvão dentro do vaso em m^3
V_{ci}	Volume inicial de carvão com o vaso aliviado
V_{MAX}	Vazão máxima de transporte do vaso em m^3/h na CNTP
V_{MIN}	Vazão mínima de transporte do vaso
V_N	Volume atual de nitrogênio dentro do vaso
V_{nf}	Volume final de nitrogênio
V_{ni}	Volume inicial de nitrogênio
$V_s(t)$	Velocidade da partícula com faixa de medição
$V_s(t)$	Velocidade da partícula medida pelo "Densflow"
V_T	Volume de carvão mais Volume de nitrogênio
$V_Z(t)$	Vazão de carvão pulverizado na linha principal
$W(t)$	Peso atual do vaso de injeção fornecido pelo sistema de pesagem

$W(t-6)$	Peso do vaso de injeção 6 segundos atrás
W	Medição de peso em tempo real do vaso de injeção
$W(t)$	Peso atual do transmissor de peso do vaso de injeção
$W(t-6)$	Peso do transmissor há 6 s atrás
W_a	Peso atual do vaso de injeção
W_C	Valor real do peso de carvão dentro do vaso
W_{cf}	Peso final de carvão não injetado ou remanescente
W_{cf_0}	Peso final de carvão no vaso de injeção aliviado na pressão de
W_{ci}	Peso inicial do vaso de injeção (carvão +N ₂)
W_{ci_0}	Peso inicial de carvão no vaso na pressão de 0 barg
W_{CO}	Peso de carvão acrescido devido ao carregamento do vaso oposto
$W_{máx}$	Peso máximo de carregamento do vaso
$W_{mín}$	Peso mínimo para troca do vaso
W_N	Valor do peso de nitrogênio inserido na fase de injeção
x	Variável manipulada do controlador normalizada em por unidade
y	Distância de penetração dos círculos da seção reta da dosadora
Z	Fator de Compressibilidade do N ₂ ($Z=0,9998$)
ZI	Posição atual da válvula dosadora
Z^{-1}	Operador da transformada Z
δ	Desvio padrão da vazão de carvão obtida com as estratégias e malhas de controle fechadas em operação
$\varepsilon_1(t)$	Matriz 1 de erros dos modelos do transporte pneumático
$\varepsilon_2(t)$	Matriz 2 de erros dos modelos dinâmicos da estação de injeção

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OS ALTOS-FORNOS E A INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO	1
1.2 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLOGIA ATUAL.....	4
1.3 OBJETIVOS DA TESE	6
1.4 ESTRUTURA DA TESE	11
1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS	12
2 INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM ALTO-FORNOS	15
2.1 INTRODUÇÃO.....	15
2.2 PCI - SISTEMA DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO	15
2.3 TECNOLOGIA PARA TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE SÓLIDOS.....	21
2.3.1 Fase densa	23
2.3.2 Fase diluída	23
2.4 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS PARA PCI.....	23
2.4.1 Tecnologias de controle dos vasos de injeção.....	26
2.4.2 Métodos e malhas de controle fechada para a vazão de carvão.....	31
2.5 ESTAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO DA CSN.....	31
2.6 DESCRIÇÃO DAS QUATRO FASES ORIGINAIS DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO	34
2.7 O ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA IMPLANTADA.....	39
2.7.1 Malhas de controle da estação de injeção	40
2.7.2 Controle da pressão dos vasos	40
2.7.3 Controle da vazão de carvão.....	41
2.7.4 Vazão de nitrogênio de transporte	41
2.7.5 Sistema de controle da vazão de fluidização	42
2.8 CONCLUSÕES PRELIMINARES.....	43

3 CRITÉRIOS PARA AVALIAÇÃO DA VARIAÇÃO INSTANTÂNEA DA VAZÃO DE CARVÃO PULVERIZADO PARA OS ALTOS-FORNOS	44
3.1 OBJETIVO	44
3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE VARIAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO	44
3.3 O EFEITO DA VARIAÇÃO DE CARVÃO NO ALTO-FORNO	48
3.4 MEDIDA DA VARIABILIDADE DA VAZÃO DE CARVÃO	49
3.5 DEFINIÇÕES DAS FAIXAS DE CONTROLE DE QUALIDADE.....	51
3.6 HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL.....	52
3.7 CONCLUSÕES PRELIMINARES.....	54
4 SEQÜÊNCIA LÓGICA E INTERTRAVAMENTOS DE SEGURANÇA	55
4.1 EXPANSÃO DA CAPACIDADE NOMINAL DE VAZÃO	55
4.2 CAPACIDADE DE INJEÇÃO DO PCI	56
4.3 CAPACIDADE MÁXIMA DE INJEÇÃO	57
4.4 ESTRATÉGIA DA EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE INJEÇÃO	58
4.4.1 Fase de carregamento dos vasos	59
4.4.2 Fase de alívio dos vasos	59
4.4.3 Fase de pressurização	60
4.4.4 Fase de injeção	61
4.5 RESULTADOS DA EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE VAZÃO.....	61
4.6 REDUÇÃO DAS QUEDAS DE INJEÇÃO	63
4.6.1 Queda por número mínimo de lanças	63
4.6.2 Vazão baixa de sopro do alto-forno.....	65
4.6.3 Vazão baixa de nitrogênio de transporte.....	65
4.6.4 Queda de injeção por pressão diferencial baixa	67
4.6.5 Alarmes antecipatórios de queda de injeção.....	68
4.7 ALGORITMO DE CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO	68
4.8 SINCRONISMO DO CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO.....	73
4.9 RETOMADA AUTOMÁTICA DA INJEÇÃO APÓS UMA QUEDA	74

4.10 NOVA SEQUÊNCIA PARA A INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO.....	76
4.11 ESPERA DESPRESSURIZADA DOS VASOS DE INJEÇÃO.....	81
4.12 DESCRIÇÃO DA PRÉ-PRESSURIZAÇÃO DOS VASOS.....	82
4.13 PRESSURIZAÇÃO DO ANEL DE FLUIDIZAÇÃO DOS VASOS.....	85
4.14 PROBLEMA DA FALHA NA VAZÃO DE FLUIDIZAÇÃO.....	85
4.15 SISTEMA DE PRESSURIZAÇÃO DO ANEL DE FLUIDIZAÇÃO.....	87
4.16 RESULTADOS OBTIDOS.....	90
4.17 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	91
5 DISTRIBUIÇÃO UNIFORME DE CARVÃO PULVERIZADO NAS VENTANEIRAS DOS ALTOS FORNOS.....	95
5.1 UNIFORMIDADE DE CARVÃO EM UM DISTRIBUIDOR ESTÁTICO.....	95
5.2 PURGA DAS LANÇAS DE INJEÇÃO.....	96
5.2.1 Purga programada.....	96
5.2.2 Purga automática das lanças de injeção.....	97
5.3 PROBLEMAS NA DISTRIBUIÇÃO UNIFORME.....	97
5.4 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA MONITORAÇÃO DOS INTERTRAVAMENTOS DE SEGURANÇA DAS LANÇAS DE INJEÇÃO.....	99
5.5 INTERTRAVAMENTO DE SEGURANÇA DA VAZÃO DO TUBO RETO PARA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO.....	105
5.6 INTERTRAVAMENTO DE VAZÃO DE SOPRO PARA PCI.....	106
5.7 NOVOS INTERTRAVAMENTOS PARA A VAZÃO DO TUBO RETO.....	108
5.8 GERENCIAMENTO DAS LINHAS DE INJEÇÃO DE CARVÃO.....	111
5.9 INJEÇÃO EM LANÇA DUPLA EM MESMO ALGARAVIZ.....	112
5.10 RESULTADOS E CONCLUSÕES.....	113
6 A CORRETA MEDIÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO PULVERIZADO.....	115
6.1 OBJETIVOS DE SE DETERMINAR A VAZÃO DE CARVÃO.....	115

6.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO	116
6.3 O ERRO NA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR CÉLULAS DE CARGA	118
6.4 QUANTIDADE DE CARVÃO INJETADO NO ALTO FORNO	123
6.5 INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS	125
6.6 CORREÇÃO PARA ELIMINAÇÃO DO ERRO DE MEDIÇÃO	127
6.7 CONCLUSÕES.....	129
7 SISTEMA DE MEDIÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO	
PULVERIZADO	130
7.1 OBJETIVOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE CARVÃO ALTERNATIVA..	130
7.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO	
PULVERIZADO EM SISTEMAS DE INJEÇÃO	131
7.3 SISTEMAS DE MEDIÇÃO DE VAZÃO DE SÓLIDOS ATUAIS	132
7.4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO	133
7.5 ALGORITMO DE AUTOCALIBRAÇÃO DESENVOLVIDO	137
7.6 GERAÇÃO DO SINAL DE FALHA DE FLUXO DE CARVÃO	137
7.7 RESULTADOS DOS SINAIS OBTIDOS COM O DENSFLOW	139
7.8 CONCLUSÕES SOBRE A NOVA MEDIÇÃO DE VAZÃO	
IMPLANTADA.....	141
8 MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO DA ESTAÇÃO	
DE CARVÃO PULVERIZADO	142
8.1 OBJETIVOS DA MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO	142
8.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE CONTORNO DO MODELO	143
8.3 DIAGRAMAS EM BLOCOS DOS MODELOS DINÂMICOS	146
8.4 RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO	147
8.4.1 Pressão de injeção	147
8.4.2 Vazão de nitrogênio de transporte ou vazão de arraste.....	148
8.4.3 Vazão de nitrogênio de fluidização.....	148
8.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS VÁLVULAS DE CONTROLE.....	149
8.6 CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA DOSADORA.....	152

8.7 MODELO FÍSICO DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO COM O VASO...	154
8.8 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	157
8.8.1 Relação sólido/gás	158
8.8.2 A densidade de fluxo e densidade de linha.....	159
8.8.3 Temperatura final do fluxo bifásico.....	161
8.8.4 A velocidade das partículas de carvão.....	163
8.9 MODELO DE PERDA DE CARGA DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO.	164
8.10 MODELO DINÂMICO DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO.....	168
8.11 DIAGRAMAS DAS VELOCIDADES DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO	170
8.12 VALIDAÇÕES E RESULTADOS DOS MODELOS	174
8.13 CONCLUSÕES DA MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO	176
9 MODELAGEM DINÂMICA DA ESTAÇÃO DE CARVÃO.....	178
9.1 OBJETIVOS DO MODELO DINAMICO DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO....	178
9.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DA MODELAGEM DINÂMICA.....	179
9.3 MODELAGENS INDIVIDUAIS DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE	181
9.3.1 Sensores e a nova instrumentação dedicada.....	182
9.3.2 O controle de vazão de nitrogênio de fluidização do cone base do vaso.....	182
9.3.3 O controle de vazão de nitrogênio de transporte da linha principal.....	183
9.3.4 O controle de pressão do vaso de injeção	184
9.3.5 O controle da vazão mássica na linha principal	184
9.4 MODELO FÍSICO NÃO LINEAR DE QUATRO DIMENSÕES	186
9.5 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO	192
9.5.1 Dados de medição.....	193
9.5.2 Modelo para a pressão dentro do vaso	193
9.5.3 Modelo para a massa dentro do vaso	194
9.5.4 Modelo para a vazão de carvão na linha principal de injeção.....	194

9.5.5 Modelo para a vazão de nitrogênio de transporte	195
9.6 MODELO MIMO EM Z DESENVOLVIDO NA CSN.....	195
9.7 RESULTADOS DO MODELO MIMO	198
9.8 CONCLUSÕES DA MODELAGEM DINÂMICA	200
10 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA A VAZÃO DE CARVÃO	201
10.1 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE ADOTADAS NO PCI	201
10.2 DESCRIÇÃO DO CONTROLE DA INJEÇÃO DE CARVÃO	201
10.3 PRODUÇÃO INSTANTÂNEA DE FERRO-GUSA DO ALTO-FORNO..	204
10.4 CONTROLE DA VAZÃO PELO RITMO DE CARGA DO ALTO-FORNO	207
10.5 IMPLANTAÇÃO DE BANDA MORTA VARIÁVEL NO CONTROLADOR.....	208
10.6 FILTROS PARA O CONTROLE DE VAZÃO DE CARVÃO	211
10.7 A ABERTURA INICIAL DA VÁLVULA DOSADORA NA INJEÇÃO.....	215
10.8 MALHA DE CONTROLE DE VAZÃO DE LONGO PRAZO.....	218
10.9 A NOVA MALHA DE CONTROLE PARA A VAZÃO INSTANTÂNEA ...	223
11 RESULTADOS E CONCLUSÕES SOBRE AS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE PARA A VAZÃO DE CARVÃO	225
11.1 RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE IMPLANTADAS.....	225
11.2 CONCLUSÕES SOBRE A INJEÇÃO POR RITMO DE CARGA.....	226
11.3 RESULTADOS NA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO	228
11.4 RESULTADOS NOS INTERTRAVAMENTOS DE SEGURANÇA	230
11.5 RESULTADOS DAS MODELAGENS	231
11.6 CONCLUSÕES FINAIS DA TESE	232
12 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	233

Capítulo 1

Introdução

1.1 OS ALTOS-FORNOS E A INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

O alto-forno é um processo contínuo de produção de ferro-gusa, em torno de 1500°C a partir do minério de ferro, e outros insumos juntamente com o carvão, conforme descrevem Castro e Tavares [1]. Isto é possível fazendo uma corrente de gás quente passar contra a carga que é constituída por camadas de minério de ferro, coque e calcário. O carbono presente no coque tem dois objetivos: combinar-se com o oxigênio do minério, de forma a liberar o ferro metálico e gerar calor para as reações químicas em alta temperatura e possibilitar a redução do minério de ferro para ferro-gusa.

A utilização de coque em altos-fornos é necessária apesar das restrições ambientais e os custos envolvidos. Para diminuir a quantidade de coque utilizado no processo, são adotadas medidas como a injeção de hidrocarbonetos. O processo de injeção de carvão pulverizado (Pulverized Coal Injection - PCI) para os altos-fornos tem por objetivo substituir parcialmente o coque carregado pelo topo do alto-forno. O carvão pulverizado propicia um maior retorno econômico, quando utilizado no processo de fabricação do ferro-gusa, pois permite a maior capacidade de taxa de injeção ao se comparar com o emprego de óleos, gases e outros hidrocarbonetos. Isto aumenta a produção e melhora as condições ambientais e econômicas do processo siderúrgico do setor de produção do coque (Coqueria) e altos-fornos como um todo de acordo com Assis [2] e Ishii [3]. As indústrias siderúrgicas foram forçadas pelo mercado na década de 80 a instalarem diversos PCI como forma de redução de custos e sobrevivência.

A vazão do carvão pulverizado deve ser controlada para que a sua combustão tenha um melhor desempenho e eficiência, além de se obter margens de segurança na operação e manutenção desta fase do processo. Esta tese trata do estudo e da implantação de ações para tornar o processo de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos mais eficiente, seguro, estável, confiável e preciso.

A Figura 1.1 ilustra um sistema típico de injeção de carvão pulverizado com uma planta de moagem e uma estação de injeção, com dois vasos trabalhando em ciclos alternados. Enquanto um dos vasos está injetando carvão no alto-forno com o auxílio do transporte pneumático, o outro vaso está se preparando para a injeção nas fases de alívio, carregamento de carvão, espera despressurizada, pré-pressurização com nitrogênio de pressão baixa e finalmente a fase de pressurização rápida com nitrogênio de pressão alta até atingir a pressão de injeção.

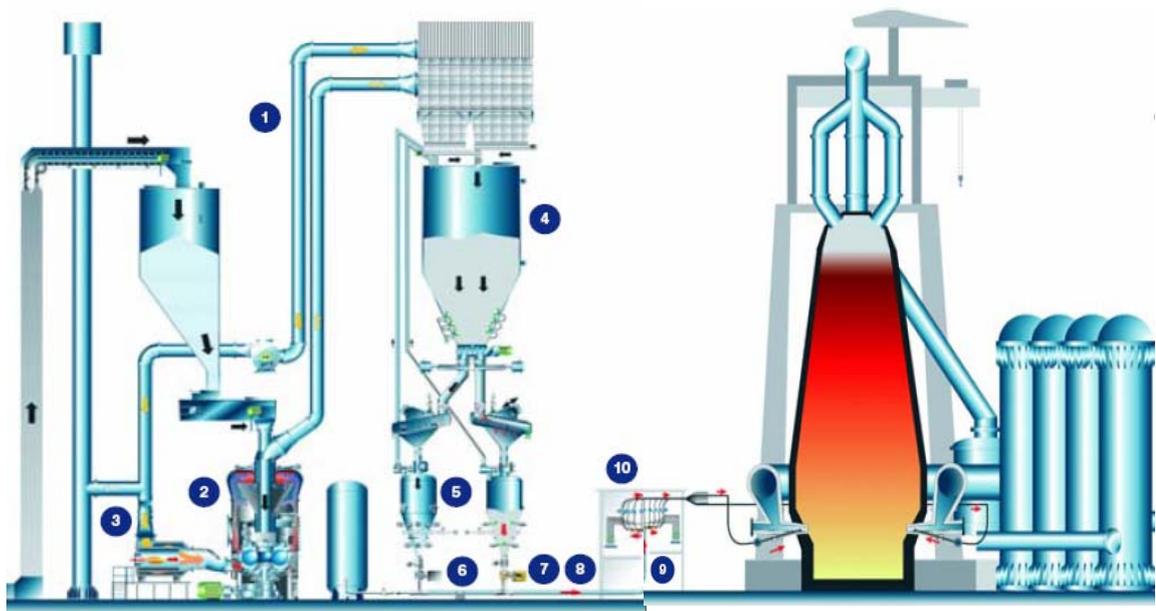


Figura 1.1 - Sistema de injeção de carvão pulverizado;

Na Figura 1.1 tem-se:

- 1 - Moagem de carvão pulverizado;
- 2 - Moinho de carvão mineral bruto (grosso);
- 3 - Gerador de gás quente;
- 4 - Silo de armazenagem de carvão pulverizado (fino);
- 5 - Vaso de injeção;
- 6 - Compressores de nitrogênio;
- 7 - Válvula dosadora de carvão pulverizado;
- 8 - Linha principal de transporte pneumático;
- 9 - Distribuidor de carvão;
- 10 - Alto-forno.

O sistema de injeção de carvão pulverizado, PCI, da Companhia Siderúrgica Nacional (CSN) foi fornecido e comissionado pela empresa Babcock Material Handling- BMH (atualmente Claudius Peters) em 1997, que forneceu toda a engenharia básica para o controle de todos os processos, conforme descrição funcional de Weber e Shumpe [4]. O PCI da CSN possui três estações de injeção com capacidade nominal de 50 t/h cada, sendo uma para o Alto-forno 2 (AF2) e duas estações para o Alto-forno 3 (AF3). Cada estação possui dois vasos que trabalham em ciclos e fases alternadas de modo a garantir a continuidade da vazão de carvão na linha principal de transporte pneumático. Este sistema de dois vasos paralelos também é conhecido como vasos gêmeos simétricos, ver Mills [5].

A Figura 1.2 ilustra em maiores detalhes o projeto original da injeção de carvão pulverizado da CSN em 1997 cuja melhoria é objeto desta tese.

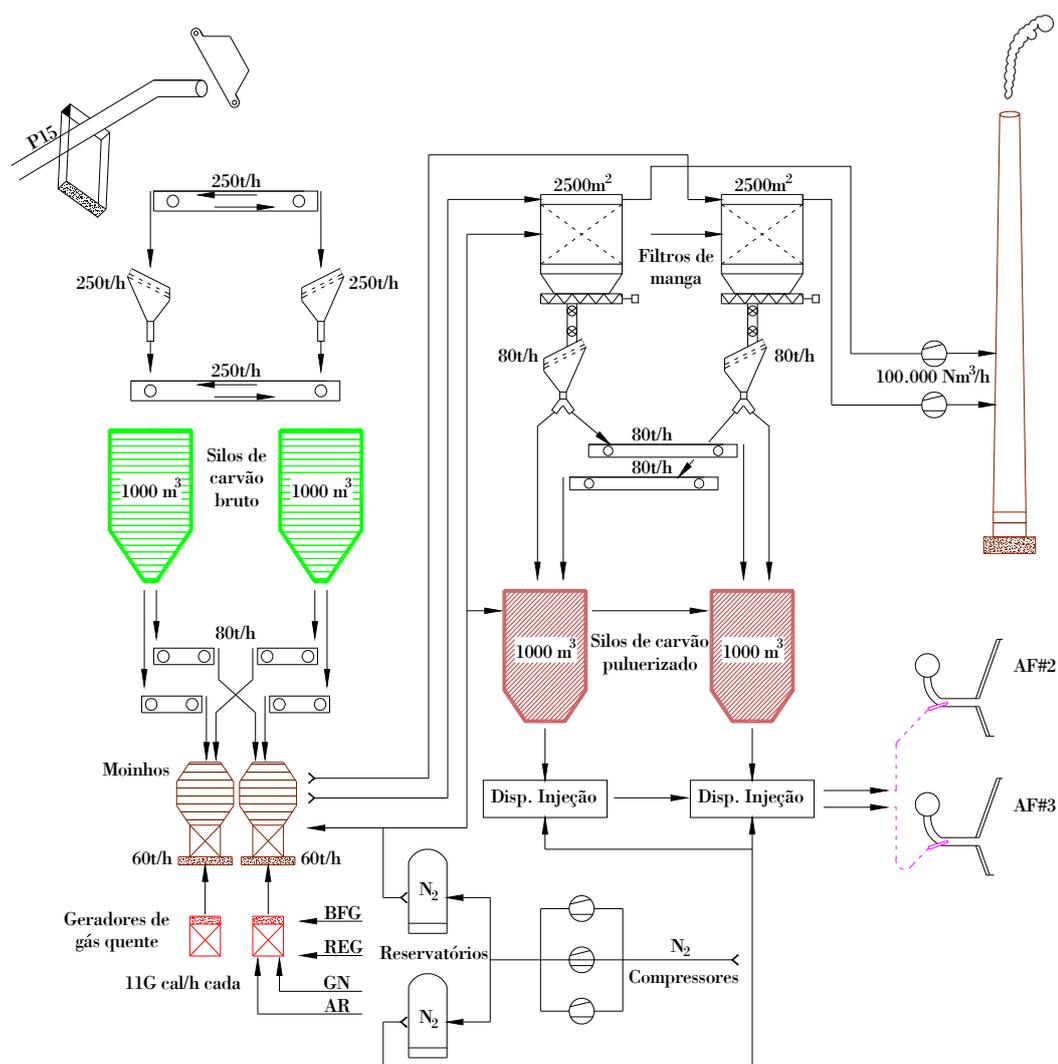


Figura 1.2 - Diagrama simplificado do sistema de carvão pulverizado contendo as estações de injeção objeto da tese, funcionando atualmente na CSN

A Figura 1.3 ilustra a planta PCI e o Alto-forno 3, onde o trabalho da tese foi desenvolvido e implantado em escala industrial.



Figura 1.3 - Alto-forno 3 e PCI da CSN

1.2 REVISÃO DA LITERATURA E TECNOLOGIA ATUAL

Atualmente a tecnologia de medição de vazão de carvão disponibiliza diversos instrumentos de medição direta e indireta utilizando-se modelos matemáticos específicos. Como a densidade do carvão pulverizado varia de acordo com a sua origem, os instrumentos atuais de mercado não garantem a confiabilidade da medição. Assim sendo, conforme Yan [6], Liptak [7] e Johansson [8], todos os medidores disponíveis, para esta aplicação, apresentam uma dificuldade básica, ou seja, não garantem a correta medição da vazão. Não se tem conhecimento de nenhuma planta PCI ou literatura que utiliza esta instrumentação especial relacionada com os resultados dos modelos dinâmicos do transporte pneumático e da estação de injeção de carvão.

Os trabalhos desenvolvidos por Wolfgang Birk ([9], [10], [11] e [12]) tratam de um controle automático dos processos de pressão e vazão de carvão, baseados na modelagem do processo e no controle efetuado por um controlador tipo “Multivariable Input Multivariable Output” (MIMO). Porém, os trabalhos não utilizam as ferramentas matemáticas para comprovação do controle, baseada na média, desvio padrão, gráficos de tendência, histogramas probabilísticos, etc. Também, não foi realizada uma medida direta do fluxo de material na tubulação de transporte, pois a tecnologia de sensor ainda não existia. Além disto, não se correlacionou os parâmetros do transporte pneumático com a modelagem dinâmica da estação de injeção, o que é crucial para um modelo realista do processo de transporte pneumático que conduz uma vazão de carvão e nitrogênio para injeção conjunta num recipiente pressurizado (alto-forno).

De todos os trabalhos pesquisados verificou-se que o de maior desempenho, já implementado, era o da estação de injeção do PCI da SSAB em Luleo/Suécia descrito em [11]. Com base neste trabalho e principalmente na experiência em campo houve alguns desenvolvimentos que foram introduzidos pela empresa Claudius Peters ao longo da implantação de vários PCI ao redor do Mundo, notadamente na CSN e Gerdau Açominas (Brasil), Ilva (Itália), Arcelor (França e Espanha), NKK (Japão), Bethleen Steel (USA), entre outras. Desde então, nenhuma pesquisa foi refeita visando a elaboração de um novo modelo.

A vazão de carvão injetada para a queima nas ventaneiras tem que ser a mais constante possível para assegurar a estabilidade das reações dos combustíveis e preservar o equilíbrio estequiométrico da combustão no interior do alto-forno (“Raceway”).

A Figura 1.4 alerta para as conseqüências da instabilidade da vazão de carvão pulverizado na ponta da lança de injeção de acordo com [2]. Observa-se que ocorrerão momentos em que haverá a falta do carvão com baixa eficiência energética do processo e momentos em que ocorrerá a sobra de carvão provocando uma diminuição na permeabilidade do alto-forno e queima incompleta do carvão.

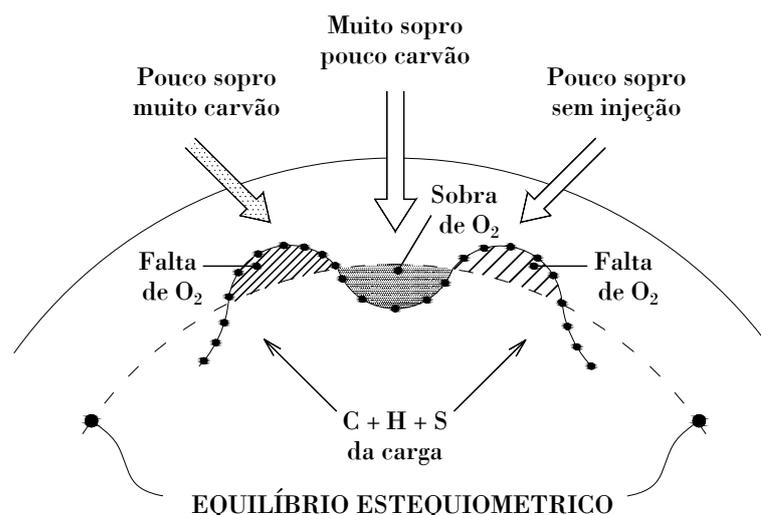


Figura 1.4 - Influência da variabilidade da vazão de carvão pulverizado em sua queima (conforme [1])

Outro item que afeta a malha de controle de vazão de carvão em altos-fornos são as variações dos valores de referência (“set-points”) que por sua vez são colocados em cascatas com a vazão e ar quente soprado. Portanto, a variação instantânea de vazão de carvão pulverizado é amplificada pela variação trazida pelo sinal de “set-point” da malha mestre.

Segundo vários pesquisadores da metalurgia dos altos-fornos em especial Birk [12] e Silva [13], além da realidade da prática do dia-a-dia no trabalho de manutenção e controle de processo, a variação instantânea de carvão é o principal item a ser atendido para uma qualidade boa do ferro-gusa produzido, ou seja, ferro-gusa com baixo desvio padrão no teor de silício e enxofre. Isto também viabiliza a produção de aços especiais com maior valor agregado para os mesmos custos de produção ou menor custo de refino.

1.3 OBJETIVOS DA TESE

O principal objetivo da tese é minimizar todos os tipos possíveis de variações instantâneas de vazão de injeção de carvão, distribuição homogênea ao longo das lanças ao redor do alto-forno e acerto da quantidade de carvão injetada em longo prazo. As variações menores da vazão de carvão visam melhorar sua combustão e acertar o balanço de energia do alto-forno levando a uma estabilidade térmica necessária para produzir ferro-gusa com qualidade desejada pela aciaria.

Para isto, é preciso identificar e modelar o processo sobre vários aspectos de medição e controle para minimizar todos os tipos de variações da vazão de carvão tal como relata Guimarães [14]. A validação dos resultados será feita pela combinação de ferramentas estatísticas e medições diretas de vazão, velocidade e densidade de fluxo que serão implementadas no SDCD - Sistema Digital de Controle Distribuído do PCI de fabricação da Yokogawa (Vide [15]).

A Figura 1.5 ilustra os diversos fatores de processo para melhorar a combustão do carvão. O aumento da temperatura do carvão e do ar quente soprado bem como a mistura de carvões altos e baixos voláteis aceleram a combustão. A redução da velocidade da partícula permite um maior tempo de queima da partícula e finalmente a lança dupla que tem por finalidade melhorar o contato entre as moléculas de oxigênio e carvão e a mistura de carvões no “Raceway”. Estas ações são de pesquisas de outras áreas tal como Silva [13].

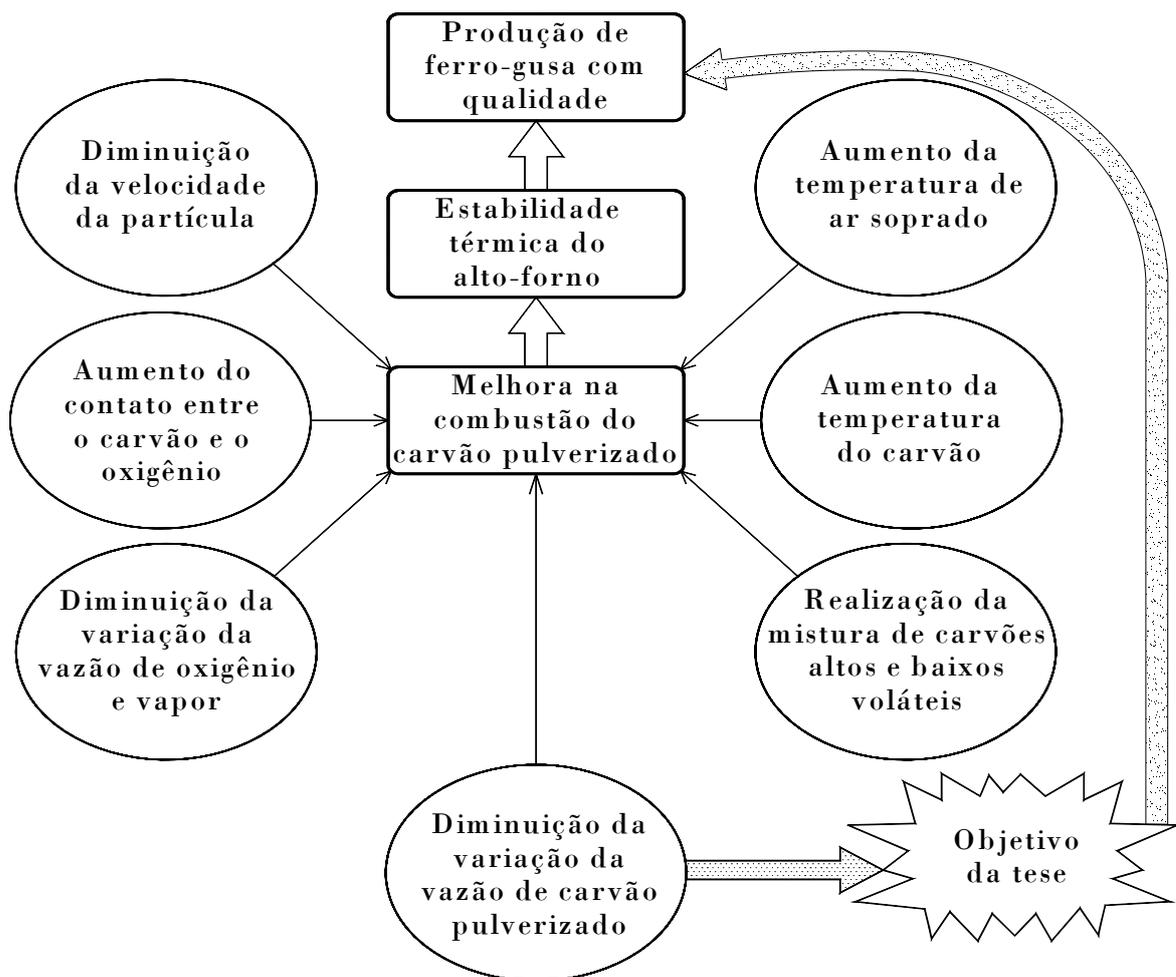


Figura 1.5 - Influência da variação da injeção na produção do alto-forno

As medições diretas são realizadas através de um instrumento industrial que fornecerá novos parâmetros do transporte pneumático do sistema de injeção. Isto tem duas funções: um maior controle na estabilidade da vazão de carvão e obter os menores valores limites de vazão para o transporte pneumático. Isto pode aumentar a eficiência energética da planta como um todo, pelo aumento da relação sólido/gás (kgCarvão/kgN_2), economizando nitrogênio para a mesma taxa de injeção e mantendo a estabilidade da vazão tal como relata Assis [2]. Porém, deve-se atentar ao aumento do risco de entupimento da linha. Será visto nesta tese como evitá-lo.

Este instrumento permitirá aprimorar o atual sistema de vazão por células de carga, pois possui uma nova função de auto-calibração especificada para garantir a real medição de vazão de forma a atingir os objetivos desta proposta de tese.

Os modelos matemáticos e simulações das malhas de controle dos sistemas de injeção serão usados para se testar os diversos algoritmos de controladores elaborados em [15] e novas estratégias de controle serão desenvolvidos, tais como em Mcmillan [16] e Delmeé [17].

A partir da filosofia de controle proposta pela engenharia básica de [4], dos intertravamentos de segurança adicionais e das melhorias efetuadas no processo de injeção descritas em Motta [18] e [19], irá se elaborar um trabalho voltado para a minimização da variação instantânea da vazão de carvão pulverizado injetado em altos-fornos. Com este estudo, as causas da variação de injeção poderão ser discriminadas, distinguindo-se os diversos fatores de influência de sua variabilidade.

Em Motta [20], descreve-se uma nova seqüência das fases dos vasos de injeção e intertravamentos de segurança, o que definitivamente exige uma nova abordagem na modelagem e controle a serem descritas nesta tese para um processo PCI mais avançado do que os relatados em [11] e [12].

Um ponto em comum entre esta tese e os trabalhos de [9], é que a variável de processo importante é a vazão de carvão pulverizado na linha principal. Do ponto de vista do alto-forno, a princípio, essa é a única variável de interesse. Existem outras secundárias, tais como a velocidade das partículas e a vazão de nitrogênio que é um gás inerte e entra na geração de gás do alto-forno, o que pode atrapalhar sua permeabilidade.

Altas velocidades da partícula de carvão ou do fluxo bifásico (carvão-nitrogênio) por outro lado não geram entupimentos, mas possuem menor tempo de queima no “Raceway” podendo formar “ninho de pássaro” [1]. Além disto, provocam desgaste excessivo da tubulação e consumo elevado de gás de transporte. Baixas velocidades propiciam um maior tempo de queima e menor consumo de nitrogênio, mas aumentam o risco de entupimento na linha e na lança de injeção.

No desenvolvimento do modelo físico elaborado por [12], supôs-se que o carvão pulverizado e o nitrogênio são separados de maneira ideal. Isso significa que o nitrogênio é colocado no topo do vaso enquanto o carvão pulverizado é colocado no fundo. Esta suposição é irreal, pois todo o carvão é misturado homogeneamente com o nitrogênio. Portanto, existe vazão de nitrogênio pela válvula dosadora tal como constatado na prática e é considerado neste modelo dinâmico completo e avançado a ser descrito nesta tese.

A vazão do material através do tubo de transporte não foi a principal preocupação na dissertação [9] porque a medição da vazão mássica do carvão através do tubo não estava disponível. Além disso, o comportamento da vazão em fase densa no tubo é muito complexo.

Nos resultados já obtidos e apresentados em congressos e seminários especializados, têm-se os modelos dinâmicos e os parâmetros do transporte pneumático validados pela medição da vazão de carvão obtida pelo sistema de medição de peso dos vasos e pelo novo medidor “Densflow” [21] instalado na linha principal de injeção. A vazão do material através do tubo de transporte não foi a principal preocupação em [9] porque a medição da vazão mássica do carvão através do tubo não estava disponível. Nesta tese tem-se a medição da vazão de carvão obtida pelo sistema de medição de peso dos vasos e pelo medidor “Densflow” instalado na linha principal de transporte pneumático da vazão de carvão.

Os objetivos complementares desta tese podem ser resumidos pelo diagrama da Figura 1.6 e estão associados ao objetivo principal de diminuir a variabilidade da vazão de carvão pulverizado para o alto-forno.

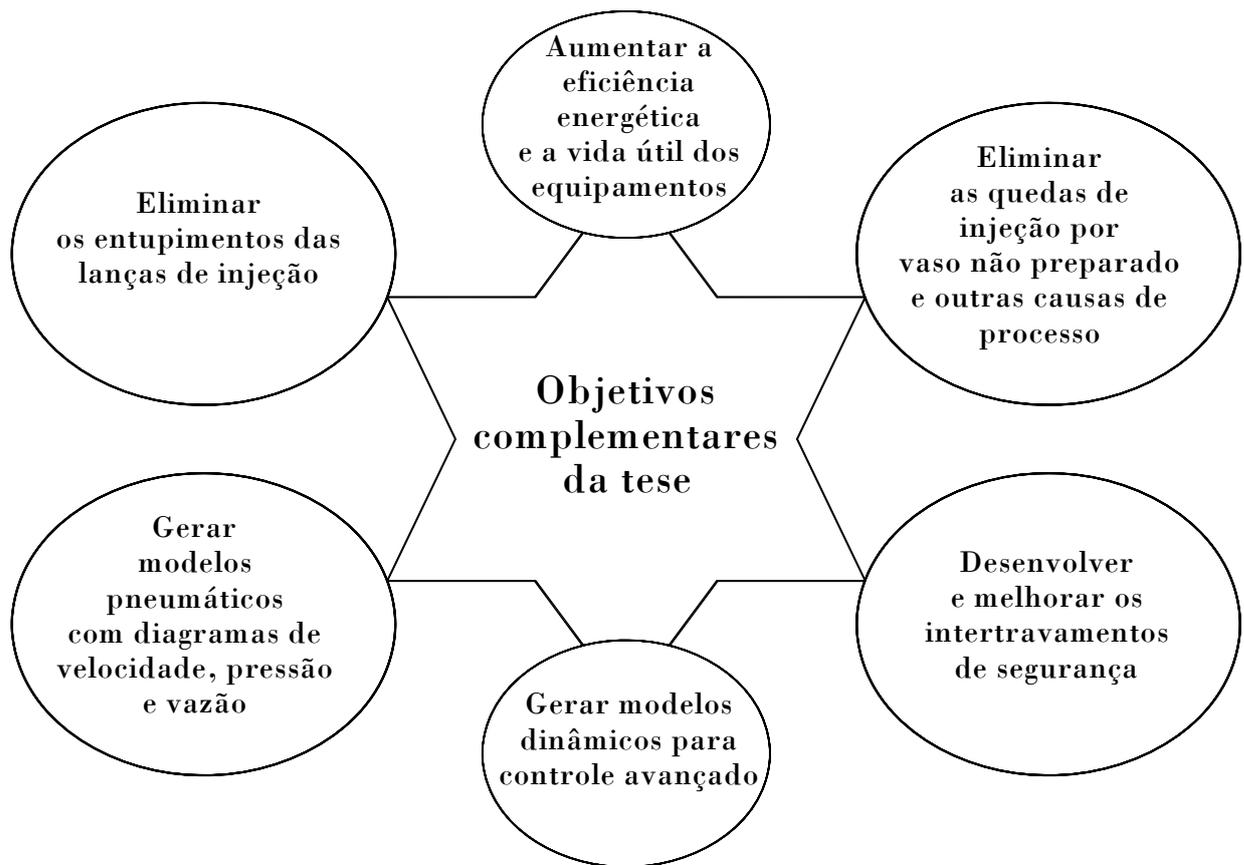


Figura 1.6 - Objetivos complementares da tese

Nota-se que, para atingir o objetivo principal, são necessárias ações complementares para eliminar ou pelo menos mitigar as quedas de injeção e entupimentos de lanças. Além destes, tem que se aumentar a vida útil das válvulas especiais (prato e alívio) para que o vaso de injeção não vaze, o que provoca uma enorme e incontrollável variação na vazão de carvão.

Outro ponto importante é desenvolver novos intertravamentos de segurança para que eliminar as variações na distribuição ao longo do alto-forno e tornar o processo operacionalmente mais seguro.

Os modelos dinâmicos serão usados para ajuste dos parâmetros do transporte pneumático visando eliminar os entupimentos de lanças e proporcionar novas estratégias de controle para a vazão de carvão pulverizado na linha principal.

A Figura 1.7 do autor [2] alerta para as conseqüências da variabilidade da vazão de carvão no "Raceway" do alto-forno

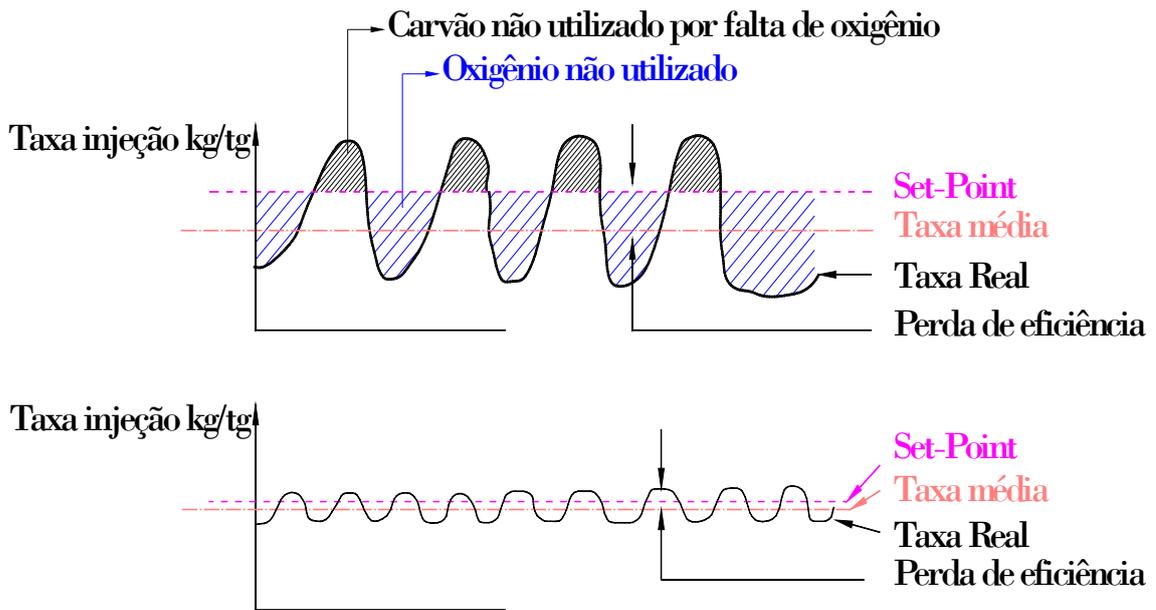


Figura 1.7 - Conseqüências da variabilidade da vazão de carvão pulverizado

Na Figura 1.7, tem-se que quando o desvio é positivo e ocorrer a sobra de carvão, ele é conduzido para o lavador de gases sem queima efetiva. Quando o desvio é negativo, ocorrerá a falta de carvão e o oxigênio que sobra é desvio do para o gás de alto-forno reduzindo o seu rendimento energético, conhecido como rendimento de CO.

Na referência [10] são tratados o controle e estabilidade da vazão de carvão, o controle da pressão de injeção e avaliação dos vazamentos. O comportamento dos vazamentos não é uma ciência exata sendo um fenômeno aleatório e caótico, e, portanto de modelagem impraticável, pois não segue uma lei clara de funcionamento, como descreve a referência [22]

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A estrutura desta tese foi montada de acordo com os desenvolvimentos realizados na sequência lógica, intertravamentos de segurança, instrumentação, modelagem e controle avançado englobando toda a automação das estações de injeção do PCI da CSN, conforme ilustra a Figura 1.8 a seguir:

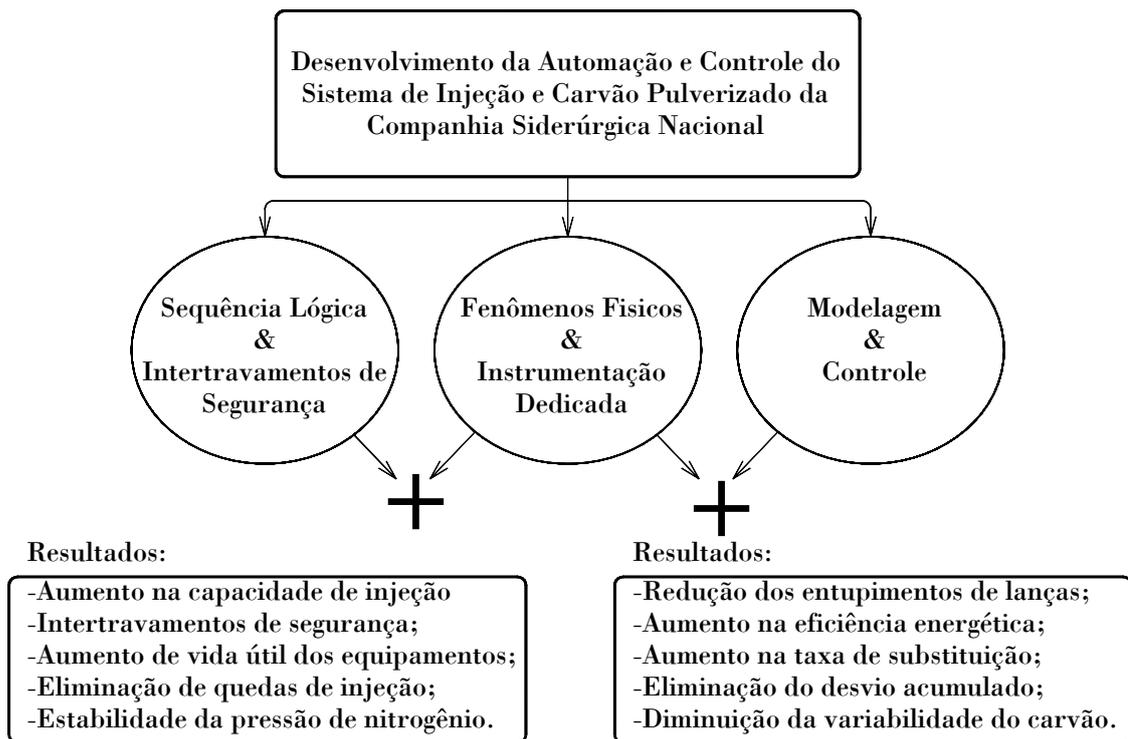


Figura 1.8 - Organização da tese

1.5 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O Capítulo 1 efetua a introdução do processo, detalha os problemas típicos da injeção de carvão com ampla revisão bibliográfica e solidifica os objetivos e metas da tese.

O Capítulo 2 descreve a estação de injeção de carvão pulverizado e seus principais equipamentos. Tem como objetivo descrever as principais fases do processo das estações de injeção bem com as suas válvulas especiais e algumas de suas principais malhas de controle, bem como o funcionamento de cada válvula que compõe o vaso de injeção de carvão pulverizado.

O Capítulo 3 ilustra os critérios e valores típicos para avaliação das variações que são usados como índices de desempenho do controlador da vazão de carvão. Foram desenvolvidas ferramentas computacionais em tempo real no SDCD para calcular a quantidade injetada, o desvio acumulado, a média, o desvio padrão e histogramas probabilísticos de dispersão Gaussiana para medir as variabilidades. Os resultados deste analisador são usados nos julgamentos das implementações das estratégias de controle da vazão de carvão a curtos e em longo prazo.

O Capítulo 4 descreve as melhorias, correções de projeto e novos equipamentos implantados no PCI visando eliminar a variação da vazão de carvão geral mais crítica do processo: a interrupção ou queda da vazão de carvão pulverizado para o alto-forno. Este capítulo modela a automação da seqüência das fases dos vasos de injeção e introduz as primeiras modelagens e temporizações das fases dos ciclos das injeções onde são obtido a capacidade máxima de injeção em tempo real e os tempos previstos para pressurização dos vasos e término da fase de injeção. A nova seqüência desenvolvida dos vasos de injeção descreve algumas das inovações desta tese em PCI que são a espera despressurizada dos vasos de injeção e a pré-pressurização com nitrogênio de pressão baixa vindo direto da Fábrica de Oxigênio (FOX) visando diminuição da variação da vazão de carvão e economia de energia elétrica. A incorporação do novo sistema de pressurização do anel de fluidização junto com os resultados é realizada, fazendo uma comparação entre o modelo novo e o atual

O Capítulo 5 apresenta os novos desenvolvimentos realizados para eliminar a variação da vazão de carvão individual das lanças após o distribuidor. São apresentados desenvolvimentos na medição de vazão no ar soprado pelo tubo reto e a lógica e funcionamento dos detectores de fluxo de carvão visando acabar com as oscilações das válvulas de carvão e conseqüente variação na lança de injeção.

O Capítulo 6 descreve e comprova o fenômeno físico do erro inerente na vazão de carvão pulverizado causado pelo transporte pneumático obrigatório. Ele descreve como é realizada a medição, seus erros e como corrigi-la além da comprovação do fenômeno e do resultado da correção.

O Capítulo 7 ilustra o instrumento de medição de vazão, velocidade e densidade de carvão pulverizado desenvolvido especialmente para esta tese com a função de calibração externa automática efetuada pelo SDCD com auxílio do sistema de pesagem baseada em célula de carga.

O Capítulo 8 efetua a modelagem do transporte pneumático e seus principais parâmetros que são usados na determinação da eficiência energética e no limite de entupimento. Ele detalha os diagramas de velocidade, vazão e pressão na estação de injeção e ao longo das tubulações de transporte pneumático que acabam por influenciar diretamente o comportamento dinâmico do sistema.

O Capítulo 9 modela dinamicamente o comportamento das malhas de controle gerando um modelo base para estudo da dinâmica do processo e para aplicações em técnicas de controle modernas. As vazões e pressões de ajuste do transporte pneumático, o balanço de massa, as densidades do nitrogênio e carvão e a temperatura final da mistura são incorporadas no modelo dinâmico. Os modelos da estação de carvão e do transporte pneumático interagem entre si de modo a se obter um modelo o mais completo possível. O modelo base MIMO completo para controle avançado é proposto.

O Capítulo 10 aborda as estratégias e técnicas de controle de processo empregadas nesta tese para mitigar a variabilidade da vazão de carvão pulverizado. Neste capítulo é apresentado o método utilizado para acabar com a variação de injeção provocada por variação brusca do “set-point” (operador) resultado do controle automático do pedido de injeção de carvão pelo ritmo de carga do alto-forno. Outros resultados são: a abertura inicial da válvula dosadora durante a troca dos vasos de injeção, a correção da integral do erro acumulado, a faixa morta e o filtro de corte da malha de controle de vazão de carvão que são ajustados automaticamente pelo SDCD conforme modelos matemáticos dos Capítulos 8 e 9.

O Capítulo 11 reúne os resultados e conclusões finais da tese e tem por objetivo efetuar uma análise global das estratégias e ações desenvolvidas nesta tese para minimizar a variação da vazão de carvão bem como seu resultado no dia-a-dia do processo.

O Capítulo 12 contém uma ampla bibliografia sobre artigos relacionados a sistemas de injeção e todos os trabalhos desta tese que foram publicados em periódicos e apresentados em congressos e seminários.

Capítulo 2

Injeção de Carvão Pulverizado em Altos-Fornos

2.1 INTRODUÇÃO

Este capítulo descreve de forma sucinta a injeção de carvão pulverizado em altos-fornos. Foram estudados diversos outros sistemas de injeção de carvão pulverizado. Os vasos paralelos gêmeos com controle de vazão de carvão global [5] do fabricante Claudius Peters [4] na tese será conhecido e indicado como PCI a partir deste momento, objeto desta tese.

As empresas siderúrgicas em busca de redução dos custos de produção do aço substituíram o combustível de carga dos alto-fornos, coque, por carvão fino que é injetado de forma pulverizado nas ventaneiras do alto-forno. Porém, esta substituição apresenta como principal desvantagem a instabilidade dos alto-fornos quando ocorre variação no fluxo de injeção de carvão pulverizado. O carvão pulverizado na sua forma pura é inflamável mesmo em condições normais, isto dificulta e torna o sistema de injeção complexo.

Assim é extremamente importante que o controle de injeção de carvão seja confiável e preciso, necessitando de medição da vazão do carvão fino, de forma indireta ou direta, e novas estratégias de controle da malha de vazão.

2.2 PCI - SISTEMA DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

O processo consiste basicamente em moer o carvão, transferi-lo para um vaso de injeção, e deste, transporta-lo pneumaticamente até o alto-forno. A injeção propriamente dita se dá através de uma lança introduzida pelo algaraviz, conforme ilustra a Figura 2.1 seguir:

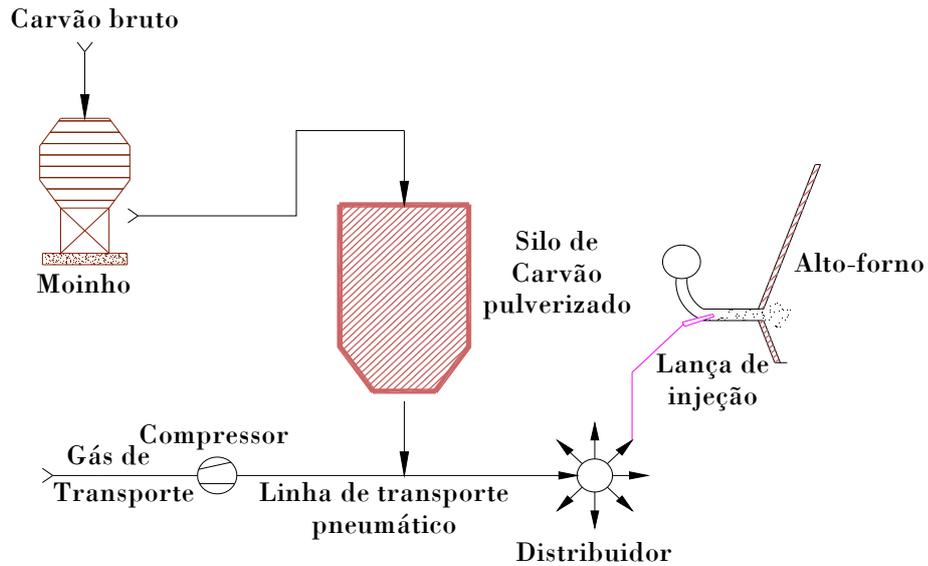


Figura 2.1 - Injeção de carvão pulverizado para altos-fornos

A Figura 2.2 ilustra um diagrama de fluxo resumido típico de um PCI com os principais equipamentos da moagem (Moinho, GGQ e Filtro de Mangas) e os principais equipamentos da injeção (Silo, peneiras, válvulas, vasos de injeção e distribuidor) bem como sua interligação de processo com o alto-forno.

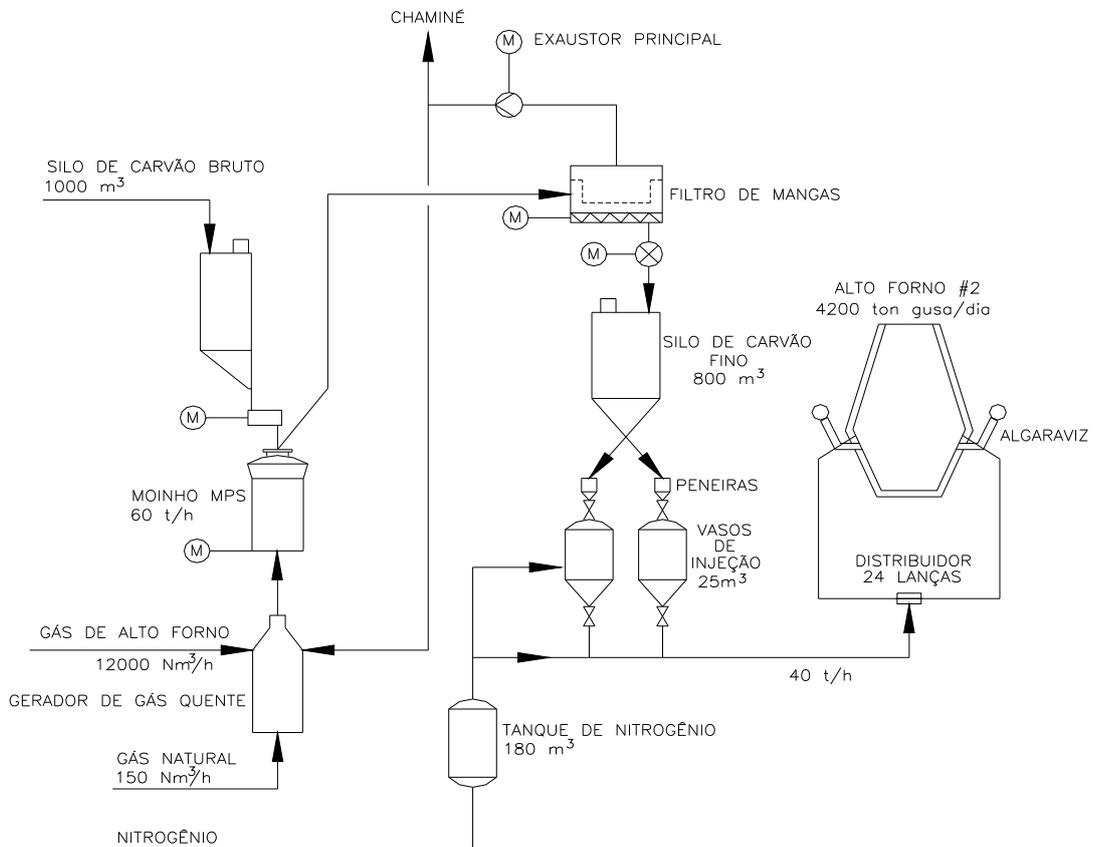


Figura 2.2 - Sistema de injeção de carvão pulverizado

A Figura 2.3 ilustra a visão geral da planta PCI da CSN. Ela possui dois sistemas de moagem e três estações de injeção de carvão pulverizado exatamente idênticos entre si. As moagens de carvão mineral bruto com moinho, gerador de gás quente e filtro de mangas possuem a capacidade nominal de 60 t/h cada. O sistema de injeção do Alto-forno 2 possui uma estação de injeção com a capacidade projetada de injetar 40 t/h e o sistema de injeção do Alto-forno 3 possui duas estações de injeção, sendo uma para a rota ímpar relativa às ventaneiras ímpares e outra para a rota par relativa às ventaneiras pares. Ambas possuem capacidade máxima de projeto de 40 t/h cada. Os dois sistemas foram projetados para injetar também um mínimo de 20 t/h cada.

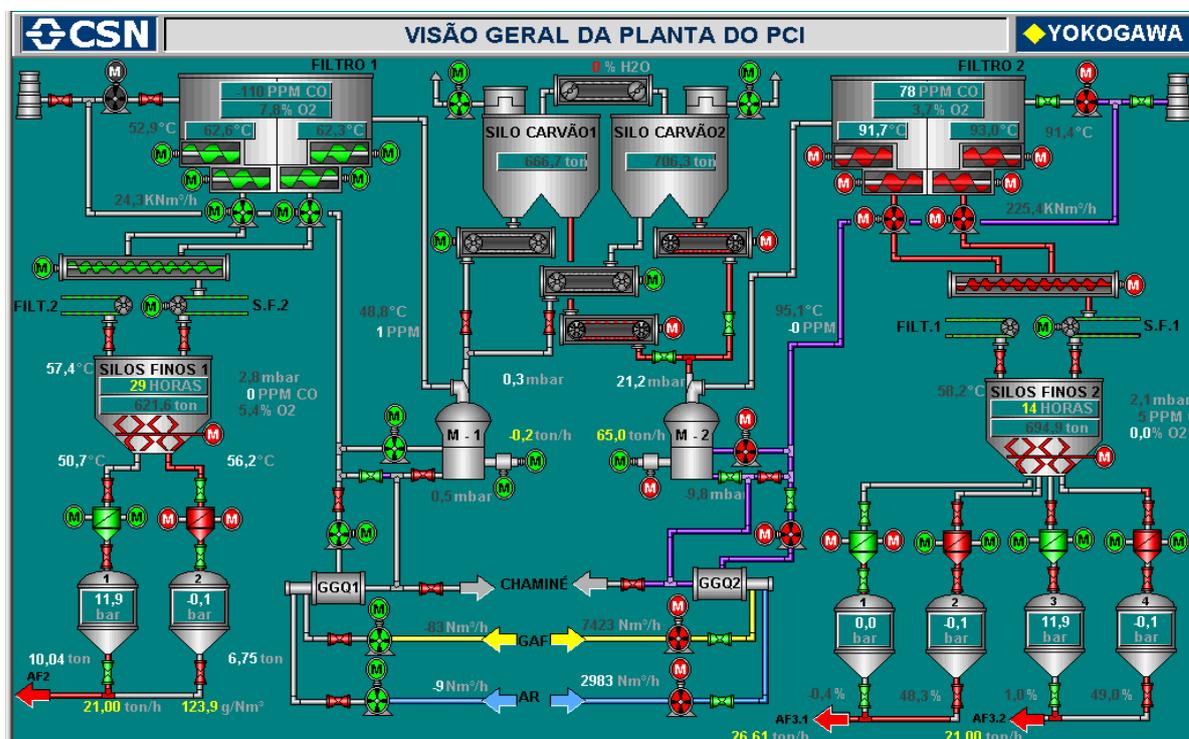


Figura 2.3 - Visão geral do PCI da CSN para os Altos-fornos 2 e 3

O PCI recebe e armazena carvões minerais de dois tipos sendo altos e baixos voláteis com granulometria de até 70 mm nos silos de carvão bruto. Nas saídas destes silos, os quatro transportadores de corrente de arraste executam o transporte do carvão bruto de modo cruzado até os moinhos. Os moinhos efetuam a moagem e secagem deste carvão para a granulometria de até 0,9 mm e umidade máxima de 2%. Os gases quentes para a secagem são fornecidos pelo gerador de gás quente (GGQ), que queima gás de alto forno e gás natural conforme ilustra a Figura 2.4:

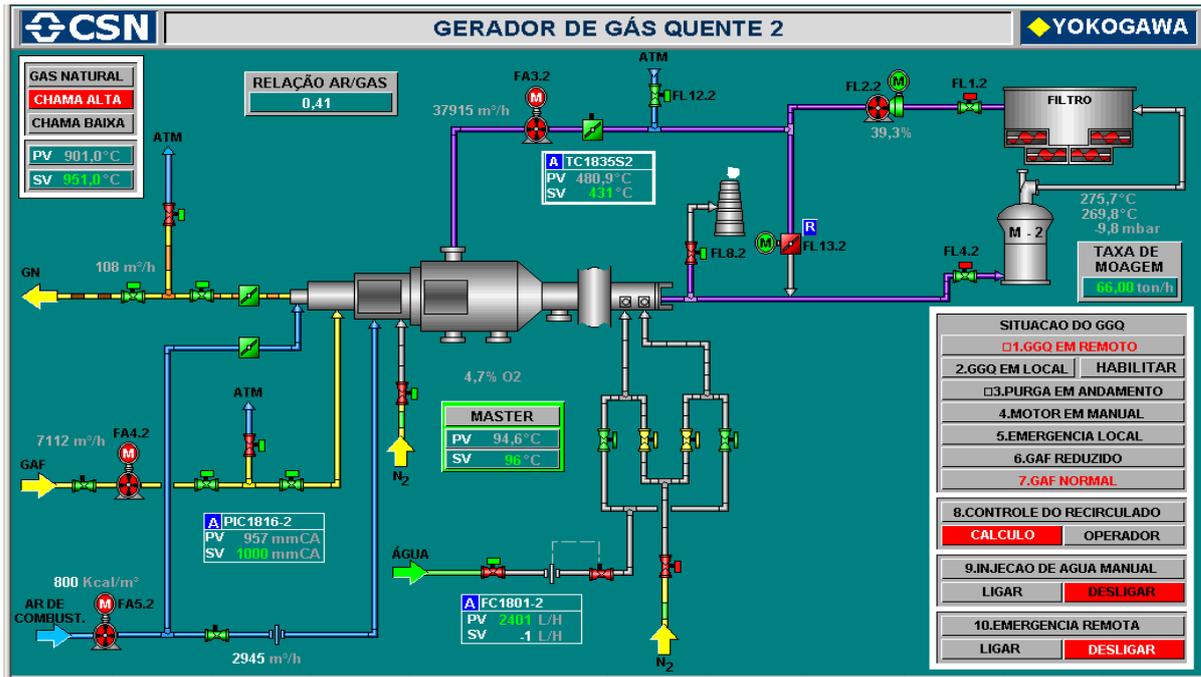


Figura 2.4 - Gerador de gás quente para secagem do carvão

O ventilador principal localizado após o filtro de mangas succiona os gases de moagem que fazem o meio de transporte dos finos de carvão pôr tubulação do moinho até o filtro de mangas. No filtro de mangas ocorre a precipitação deste carvão fino nas tremonhas, onde é arrastado pelos transportadores helicoidais e válvulas rotativas para os silos de armazenagem de carvão fino. A Figura 2.5 ilustra a planta de moagem 2 de carvão pulverizado na CSN em funcionamento.

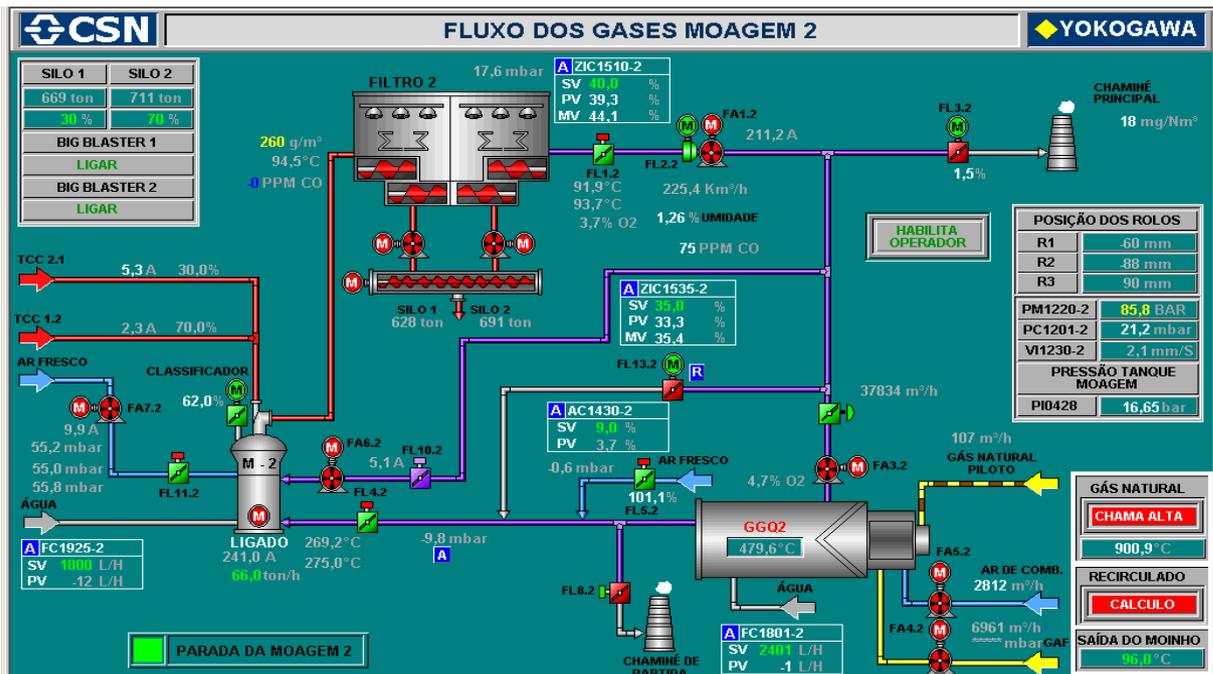


Figura 2.5 - Moagem de carvão pulverizado

Os silos de finos possuem válvulas automáticas de saída para efetuar o carregamento para cada vaso de injeção com o peso máximo de aproximadamente 12 t através de um sistema de válvulas automáticas, peneiras e tubulação.

O carvão fino cai por gravidade e é filtrado por uma peneira vibratória antes de abastecer o vaso. Esta peneira tem a função exclusiva de filtrar e reter corpos estranhos ao processo, que venham causar distúrbios de injeção tais como luvas, eletrodos de solda, parafusos, etc.

Após a pressurização rápida, o vaso recarregado com carvão, está pronto para reiniciar o ciclo de injeção. Quando o vaso de injeção recebe o sinal de peso mínimo, a troca dos vasos se inicia sem interrupção ou grande alteração na taxa de injeção. O novo vaso inicia a injeção enquanto o vaso vazio que acaba de injetar e atingir o peso mínimo típico de 2 t.

Os tempos de alívio, carregamento e pressurização, juntos, devem ser um pouco menor que o tempo para a injeção, assim o próximo vaso fica preparado esperando o vaso que está injetando atingir o peso mínimo. Segundo a tecnologia do fornecedor [4], toda a pressão do vaso é aliviada para o silo de carvão fino e então para a atmosfera, após passar pelo filtro do despoeiramento do silo de finos, visando uma nova fase de carregamento e injeção.

Os vasos de injeção são fechados e pressurizados até no máximo 13 bar, dependendo da taxa de injeção requerida. Após pressurizados os finos de carvão dentro dos vasos de injeção, são transportados por transporte pneumático em uma tubulação até o distribuidor, que conduz o carvão para as lanças individuais de cada uma das ventaneiras dos altos fornos, e são injetados para o interior do forno como combustível para a redução da carga metálica.

Cada saída do distribuidor corresponde a uma lança e uma ventaneira ou algaraviz do alto-forno. As saídas do distribuidor possuem válvulas de fechamento de carvão, detectores de fluxo individuais e válvulas de nitrogênio de alta pressão para purga em caso de entupimento.

Na Figura 2.6 a seguir tem-se a visão em topo e em corte do distribuidor e seus equipamentos principais:

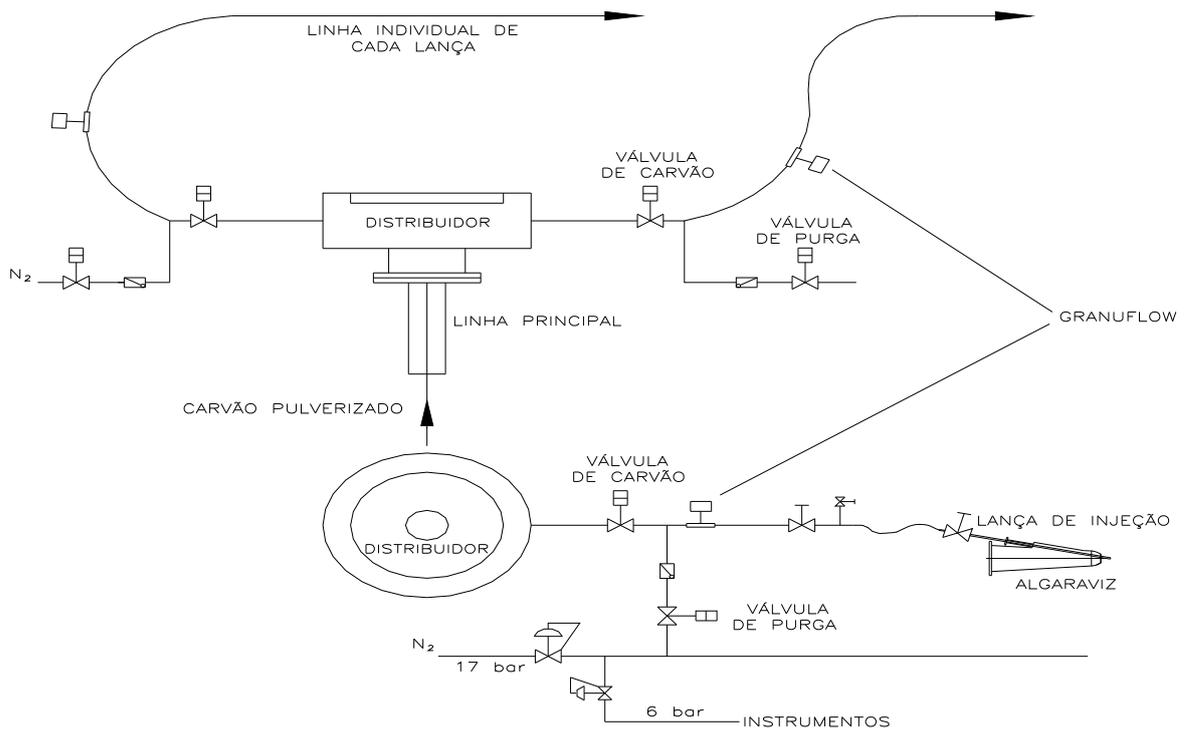


Figura 2.6 - Distribuidor estático de carvão pulverizado para altos-fornos

A Figura 2.7 ilustra a operação do distribuidor estático de carvão usado no PCI do AF2 da CSN:

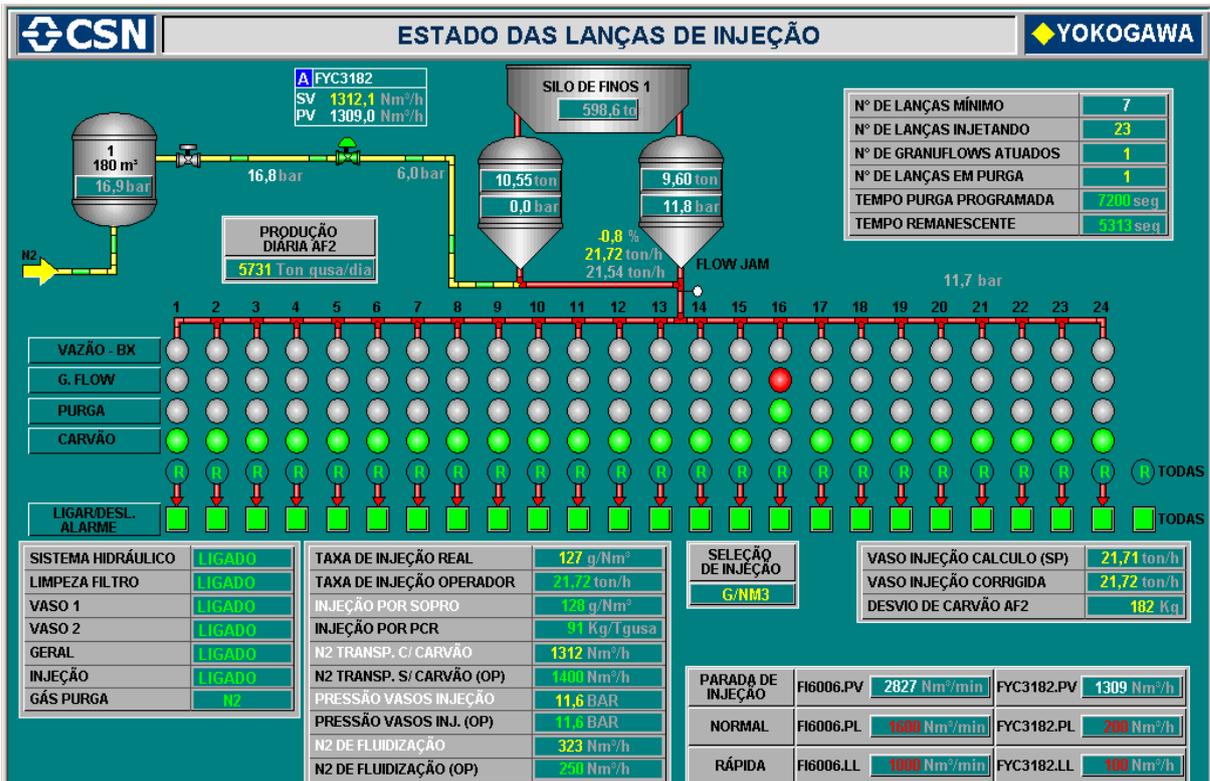


Figura 2.7 - Tela de operação do distribuidor estático de carvão

2.3 TECNOLOGIA PARA TRANSPORTE PNEUMÁTICO DE SÓLIDOS

O transporte pneumático de sólidos granulados é de extrema importância para o setor industrial, visando o controle e estabilidade para uma melhor eficiência. Os sólidos granulados, que podem ser transportados pneumaticamente variam de: farinha, grãos de trigo, plástico, carvão granulado, CaCO_2 , cal e zircão.

Diversos sistemas de injeção entre eles destacam-se [35], [36], [37], [38] e [39] possuem as mesmas características técnicas em todos os transportes de sólidos granulados em geral. O carvão pulverizado, usado na geração de energia elétrica, em termoelétricas, e produção de aço em siderúrgicas, é um exemplo fundamental para a importância da medição e controle da vazão de sólidos em tubulações pneumáticas.

A Figura 2.8 mostra um diagrama em blocos de um transporte pneumático típico utilizado em fornos aquecidos a carvão pulverizado. O abastecimento do carvão é realizado da seguinte maneira: o carvão bruto é enviado para o laminador que é pulverizado e transportado para o forno através das ventaneiras separadamente. Estações de alimentação de carvão podem ter até dez (10) transportadores de carvão pulverizado por ventaneira, com isto um total de vinte (20) ventaneiras por forno.

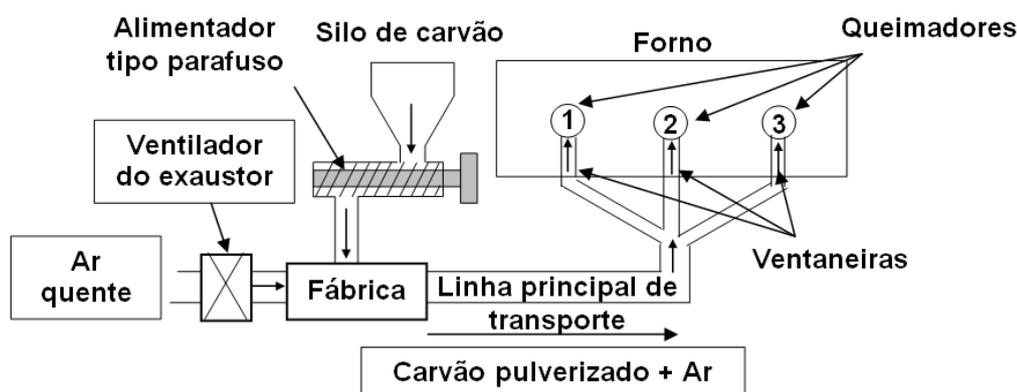


Figura 2.8 - Típico transporte pneumático de carvão

O transporte pneumático e a fluidização de sólidos em tubulações necessita de injeção de gás de transporte ou arraste, tornando a mistura bifásica, ou de duas fases - gases-sólidos conforme ilustra a Figura 2.9. Para um operador de sistema de transporte pneumático, o maior interesse é a vazão dos sólidos transportados.



Figura 2.9 - Transporte pneumático em fase diluída

A Tabela 2.1 efetua a comparação entre os métodos de transporte pneumático em fase densa e diluída disponíveis na tecnologia mundial para o transporte e injeção de carvão pulverizado.

Notam-se as vantagens do transporte pneumático de fase densa que tem sido adotado desde a década de 80 em substituição ao transporte pneumático em fase diluída, especialmente em PCI.

Tabela 2.1 - Comparação entre o transporte pneumático em fase densa e diluída	
Fase diluída	Fase Densa
a - Alta velocidade das partículas sólidas necessitando de tubulações e curvas com proteções contra abrasão e desgaste, tais como revestimentos em basalto e cerâmicas: $30 > C > 10$ m/s	a - Menor velocidade das partículas sólidas transportadas diminuindo a abrasão e desgaste da tubulação de transporte pneumático: $10 > C > 1$ m/s
b - Relação entre os sólidos e os gases transportadores baixa, necessitando de um maior fluxo de gases e eficiência energética baixa: $\mu < 5$	b - Maior relação entre o peso dos sólidos e o peso do gás de transporte significando uma maior vazão de carvão para a mesma quantidade de nitrogênio, oferecendo uma eficiência energética maior: $50 > \mu > 5$ [1]
c - Maior gasto de energia pneumática (compressores) por tonelada de carvão injetada	c - Menor gasto de energia pneumática por tonelada de carvão injetado
d - Menor queda de pressão na linha de transporte principal	d - Maior queda de pressão na linha de transporte pneumático
e - Menor nível de pressão de injeção no vaso, necessitando de menos gás para pressurização inicial e manutenção da pressão de injeção durante a fase de injeção.	e - Maior nível de pressão de injeção necessitando de mais nitrogênio de pressurização e manutenção durante a fase de injeção $20 \text{ bar} > P > 3 \text{ bar}$

2.3.1 Fase densa

A transportabilidade dos sólidos é baseada na ação turbulenta do gás na partícula de carvão. Isto significa que na fase diluída, as propriedades físico-químicas do carvão têm menor influência no transporte pneumático. Portanto, em fase diluída, o transporte pneumático é mais robusto com relação à umidade granulometria, densidade, etc., do material sólido transportado, ou seja, ele é menos sensível e menos condicionado as características do material sólido a ser transportado.

O critério de projeto requer que a velocidade de transporte das partículas seja maior que a mínima velocidade do transporte.

A transportabilidade das partículas sólidas é baseada na fluidização significando que as propriedades do material sólido, tais como fluidizabilidade, fluxabilidade e capacidade de reter gás, densidade e granulometria. Portanto, o transporte pneumático em fase densa é mais susceptível as características do material a ser transportado.

Os critérios de projeto em fase densa são mais complexos e rigorosos em relação aos projetos de transporte pneumático em fase diluída.

2.4 TECNOLOGIAS DE SISTEMAS PARA PCI

O transporte pneumático de sólidos é o processo de movimentação de matéria seca através de um tubo fechado, conforme [2]. A primeira questão que surge é como a matéria seca, nesse caso, o pó de carvão, atua em contato com um gás, nesse estudo, o nitrogênio. Como carvão pulverizado é dito ser fluidizado no vaso de injeção de carvão, a primeira impressão é de que nitrogênio e carvão pulverizado podem ser tratados como um fluido. Infelizmente, essa seja talvez uma das expressões mais mal interpretadas pelos usuários de PCI.

As primeiras experiências, com relativo sucesso, foram feitas transportando o carvão pulverizado na fase diluída e com dosagem feita basicamente através de válvulas rotativas ou se estrangulamento.

As características eram:

- Fluxo irregular;
- Controle precário;
- Consumo elevado de gás de transporte;
- Desgaste elevado nas tubulações e válvulas, devido às altas velocidades de transporte (10 a 30 m/s).

Para atender as exigências econômicas e operacionais dos altos-fornos em diminuir os custos da produção de gusa através de uma injeção confiável de carvão, que também permitisse altas taxas de injeção, que também permitisse altas taxas de injeção, era necessário desenvolver uma nova tecnologia, atendendo aos seguintes parâmetros:

- Baixo consumo de gás de transporte para diminuir investimentos, custos com energia elétrica e consumo adicional de coque para esquentar o gás frio que entra no forno com o carvão.
- Baixas velocidades nas tubulações de transporte para diminuir desgaste e custos de manutenção;
- Possibilidade de regulagem individual da quantidade de injeção em cada lança sem partes mecânicas móveis de dosagem, para permitir altas taxas de injeção sem desequilibrar o perfil térmico do alto forno;
- Possibilidade de uma regulagem em ampla gama da taxa total de injeção sem troca de equipamentos mecânicos essenciais.

Isto foi atingido através da aplicação do leito fluidizado no transporte pneumático, o chamado transporte pneumático em “fase densa”.

O termo fluidização descreve que o ângulo de repouso da matéria sobre matéria em que ela irá vazar livremente por gravidade. No caso do vaso de injeção, isso significa que o carvão pulverizado não se torna uma massa compacta no vaso e não irá aderir às paredes do vaso durante a injeção de carvão. Para constatar fluidização no vaso de injeção de carvão, tem que se garantir uma vazão de nitrogênio constante. A fluidização também depende solidamente na fabricação interna do vaso de injeção de carvão. Como esses fatores não são mensuráveis e nem analisáveis, assume-se que o pó de carvão é otimamente fluidizado.

As principais diferenças entre a velocidade (V) em m/s, pressão (P) em bar e relação sólido gás (D) adimensional são mostradas nas Figuras 2.10 e 2.11 a seguir: Na Figuras 2.10 tem-se a fase diluída com válvula rotativa no controle de vazão.

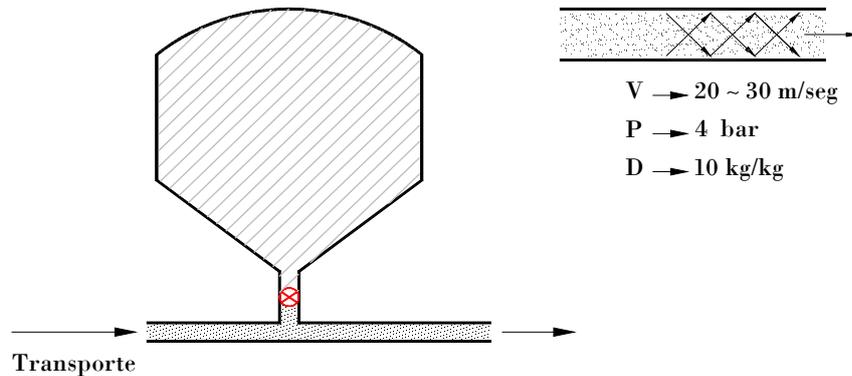


Figura 2.10 - Transporte pneumático fase diluída

Na Figura 2.11 a seguir tem-se o sistema de injeção típico do fabricante [26] com controle de vazão de carvão por válvula gaveta e câmara de fluidização na base do vaso de injeção para o fluxo bifásico (N_2 fase gasosa e carvão fase sólida):

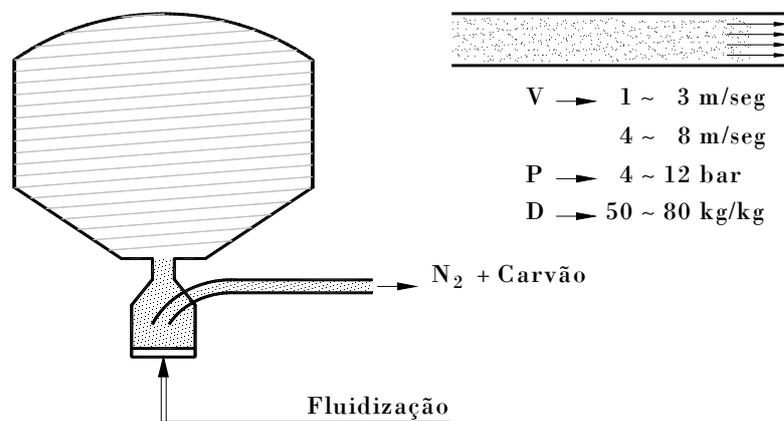


Figura 2.11 - Transporte pneumático fase densa com fluidização

A Figura 2.12 ilustra o diagrama de estado do transporte pneumático evoluindo de fase diluída para fase densa a medida que a velocidade diminui. Nota-se primeiramente as faixas de velocidade, em seguida a relação sólido gás e por último a queda de pressão em bar para os transportes em fase diluída (A), meadas (B), dunas (C) e rolhas (D) onde a criticidade e a probabilidade para o entupimento evolui na mesma proporção.

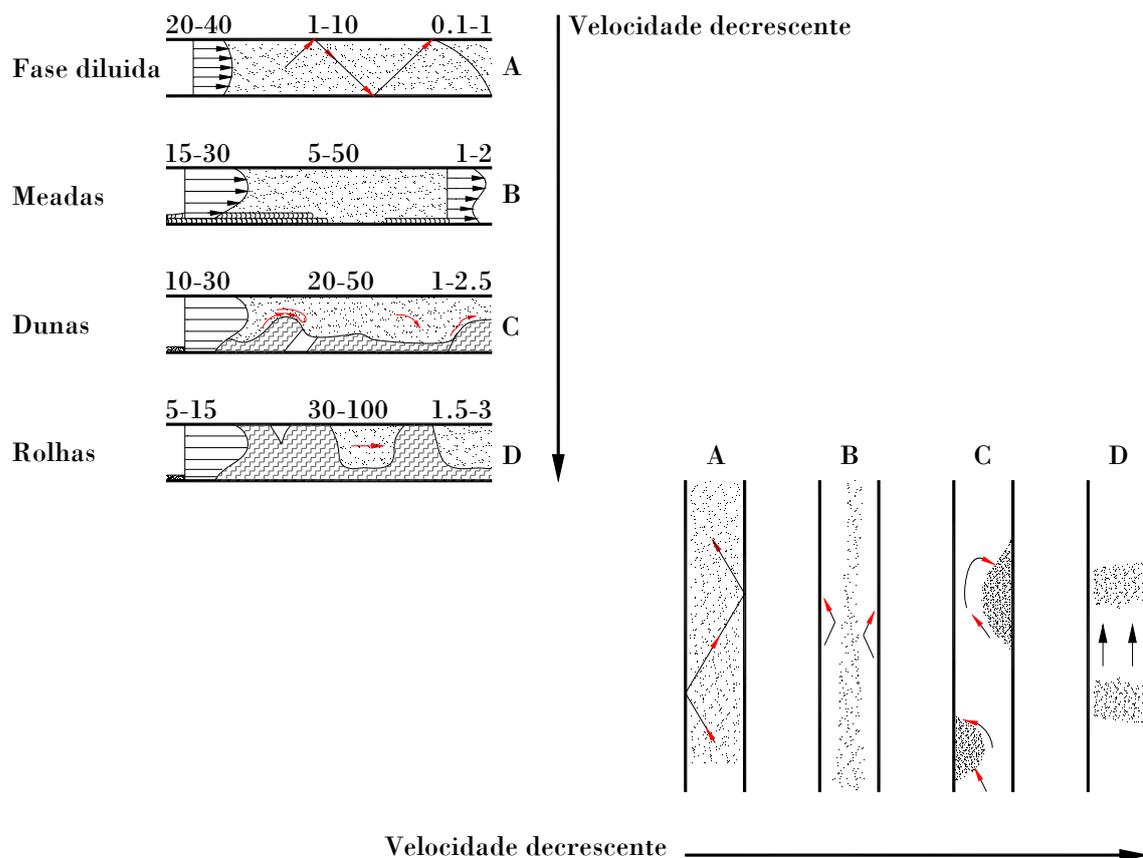


Figura 2.12 - Diagrama de estado para transporte pneumático

2.4.1 Tecnologias de controle dos vasos de injeção

O sistema de injeção de finos de carvão inclui equipamentos para preparação de carvão, transporte pneumático em fase densa e o sistema de injeção propriamente dito. Estão disponíveis no mercado mundial basicamente quatro tipos de controle de vazão com dois tipos distintos de distribuídos.

a - Sistema de controle global (distribuidor estático): o carvão pulverizado é transferido do silo de estocagem para os vasos de injeção. Através de uma tubulação única, o material é transportado para uma estação de distribuição próxima ao alto forno, tal como ilustra a Figura 2.13. O fluxo de carvão global é controlado por uma única malha de controle fechada, composta por uma válvula dosadora e um medidor de vazão da massa de carvão. Posteriormente, é transportado do distribuidor para as ventaneiras do alto forno.



Figura 2.13 - Distribuidor estático de finos de carvão

A Figura 2.14 ilustra o controle de vazão de carvão global com medição baseada em células de carga, sendo este o sistema da CSN [4] e objeto de estudo e desenvolvimento desta tese.

O vaso de injeção possui basicamente um controle de pressão (PT) e um sistema de pesagem (WT) que fornece um sinal cuja derivada discreta no tempo é usada no cálculo da vazão de carvão como um filtro de média móvel (WY) provocando um atraso (e^{-T}). O carvão pulverizado é enviado do vaso de injeção para o distribuidor estático (D) através de uma linha principal de transporte pneumático.

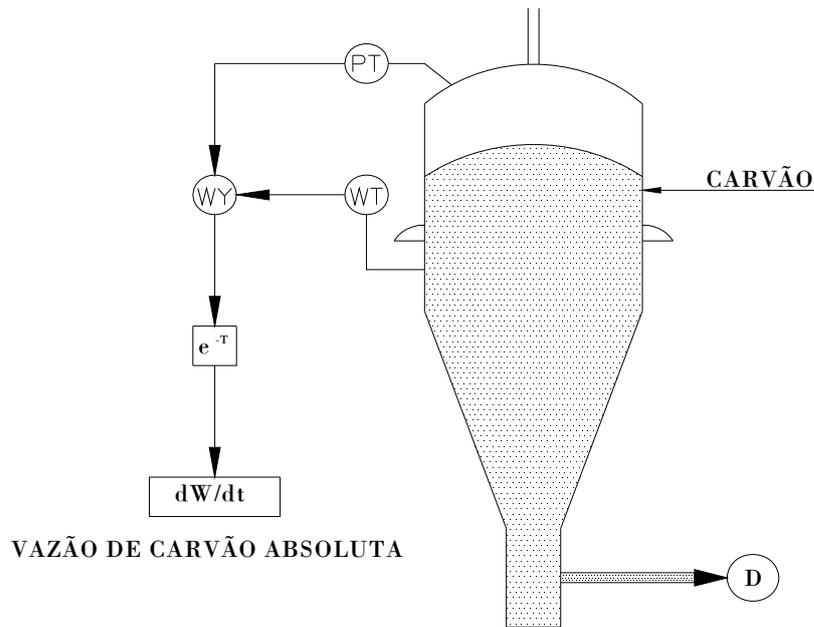


Figura 2.14 - Controle de vazão de carvão global com medição baseada em células de carga

A Figura 2.15 ilustra o controle de vazão de carvão global com sistema de pesagem e medidor de vazão na linha principal de transporte pneumático ainda com distribuidor estático, efetuado pelo fabricante [26]. O medidor de vazão de fluxo mede a velocidade das partículas de carvão (ST) em m/s e a densidade de fluxo bifásico de carvão mais N_2 (DT) em kg/m^3 .

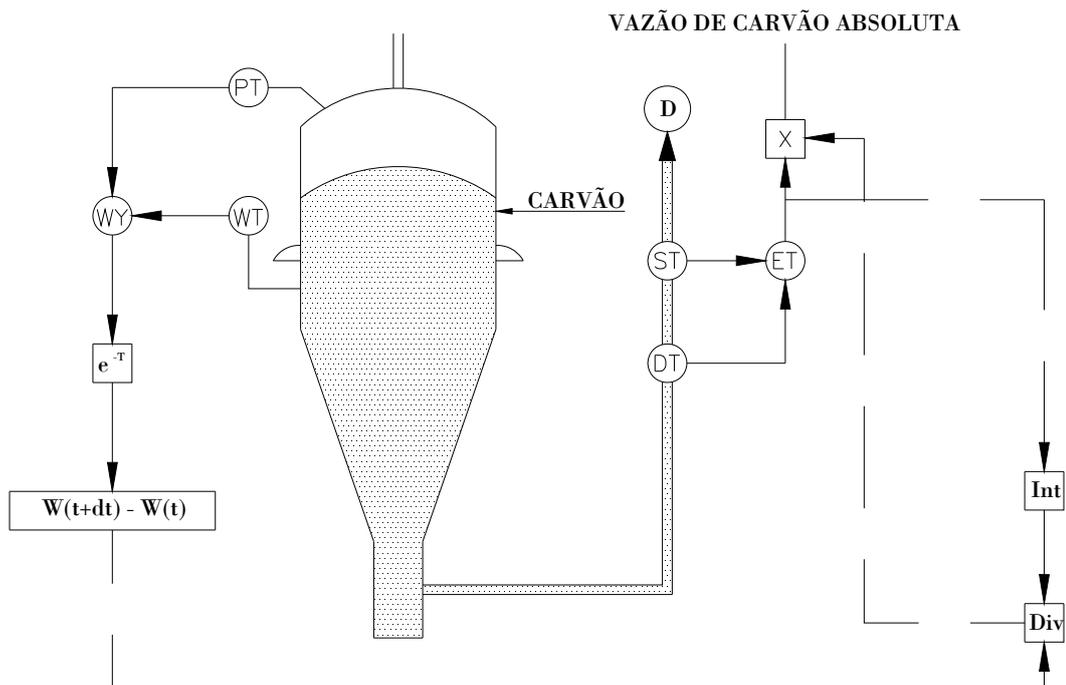


Figura 2.15 - Controle de vazão de carvão global com medidor na linha principal

b - Sistema de controle individual (distribuidor dinâmico): o carvão pulverizado é transferido do silo de estocagem para os vasos de injeção. Do vaso de injeção, o carvão é transportado em tubulações individuais até a base do alto-forno (AF), em quantidade equivalente ao número de ventaneiras, tal como a Figura 2.16. O controle do fluxo de carvão é feito em cada linha, por meio de uma malha de controle fechada, baseada em válvula dosadora e medidor de vazão mássica.

O controle de vazão de carvão individual da Figura 2.16 é baseado somente num sistema de pesagem composto de três ou quatro células de carga, ou seja, vaso de injeção com distribuidor localizado no cone base, porém sem elemento final de controle para vazão individual da lança de injeção. Este sistema é antigo e não é mais empregado em siderurgia. Ele ocorreu principalmente na década de 60 quando não havia nem a necessidade de um controle mais apurado de vazão para combustão ótima do carvão e nem o rigor da atual legislação ambiental.

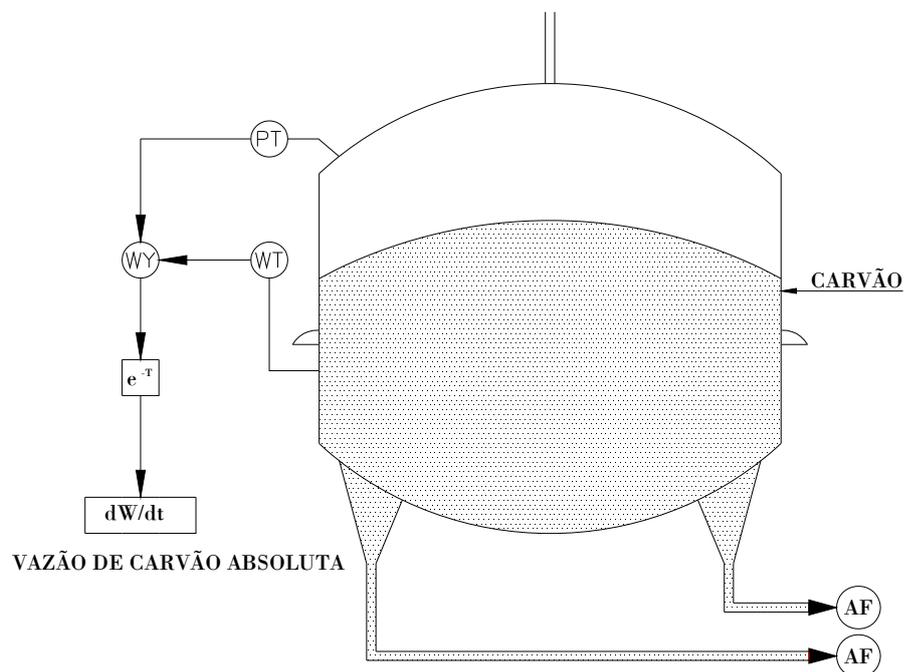


Figura 2.16 - Controle de vazão de carvão individual baseado em célula de carga geral

A Figura 2.17 ilustra o controle de vazão de carvão individual com medição e controle por lança, conhecido como distribuidor dinâmico e que garante a distribuição uniforme de carvão ao longo das ventaneiras do alto-forno conforme garantem os fornecedores [26] e [27] mundialmente conhecidos.

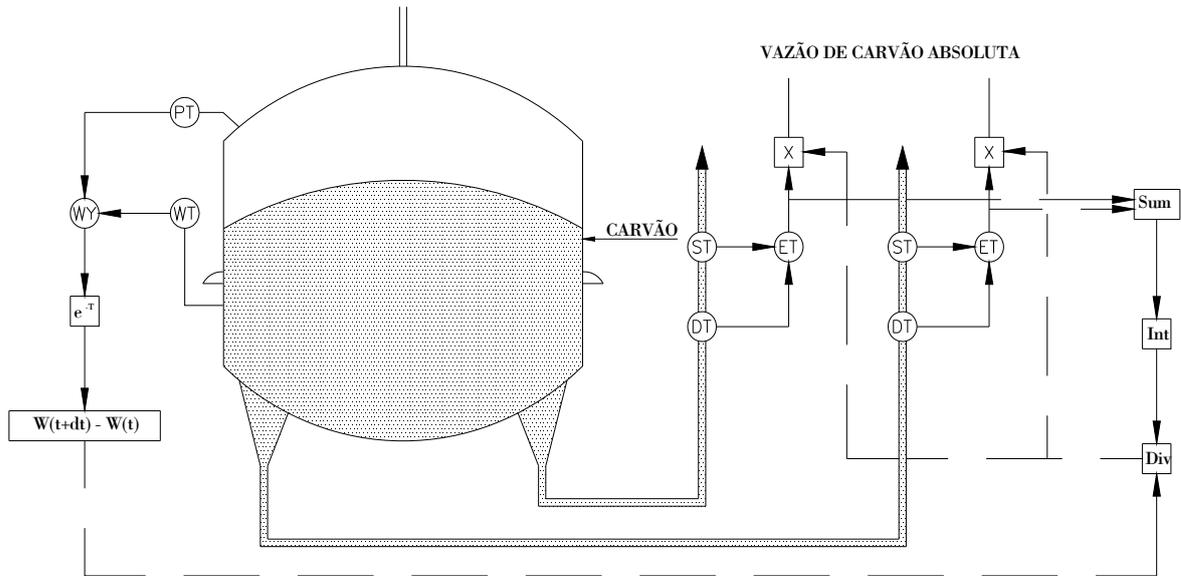


Figura 2.17 - Controle de vazão de carvão individual com medição por lança

A Tabela 2.2 exibe uma comparação entre as vantagens e desvantagens de PCI com distribuidores estáticos ou dinâmicos.

Tabela 2.2 - Vantagens e desvantagens de PCI com distribuidor estático ou dinâmico		
Tipo de distribuidor	Vantagens	Desvantagens
Estático	Menor custo de instalações	Controle individual de vazão de carvão de menor precisão e controle operacional
	Controle global da vazão de carvão na linha de transporte principal	Maior entrada de gás de transporte (inerte) no alto-forno causando aumento no volume de gás gerado;
	Espaço físico menor para a instalação dos equipamentos	
	Menor necessidade de equipamentos de medição e controle	
Vaso de Injeção Distribuidor ou Distribuidor Dinâmico	Não existe perturbação mútua na malha de controle de vazão individual de cada lança.	Maior índice de manutenção e falhas
	Proporciona uma precisão maior no controle de vazão de carvão individual de cada lança.	Controle global da vazão de carvão de forma mais complicada e difícil de se realizar na prática
	Proporciona uma distribuição uniforme de vazão de carvão ao redor de todas as vantaneiras do alto-forno.	Pequeno aumento na demanda de gás de transporte devido a uma segunda fluidização que se faz necessária na saída do controle de vazão individual de cada lança.
	Menor entrada/necessidade de gás transporte que por sua vez e injetada como inerte no alto-forno	Maior espaço físico para instalação dos equipamentos. Maior investimento financeiro na instalação.

2.4.2 Métodos e malhas de controle fechada para a vazão de carvão

A Tabela 2.3 ilustra os métodos e malhas de controle fechadas disponíveis na tecnologia mundial para o controle da vazão de carvão pulverizado, descritos nos catálogos dos fabricantes [4], [26] e [27] e comentados nos livros [5] e [28].

Tabela 2.3 - Métodos e malhas de controle fechadas para a vazão de carvão pulverizado			
Método de controle de vazão de carvão	Determinação da vazão de carvão	Perda de pressão devido ao controle ou perda de pressão através da válvula de controle	Precisão aproximada
Vaso com variação de pressão de injeção para controle de vazão global somente	Sistema de pesagem do vaso	Não possui	2 a 4%
Vaso com variação de pressão de injeção para controle da vazão global	Dispositivo de medição de vazão mássica na linha	Não possui	2 a 4%
Injeção de gás de diluição dentro da linha de transporte	Sistema de pesagem do vaso	Não possui	2 a 3%
Injeção de gás de diluição dentro da linha de transporte principal ou dentro das linhas da injeção após o distribuidor	Dispositivo ou instrumento de vazão mássica na linha principal do transporte pneumático	Não possui	1 a 2%
Válvula de controle de vazão na linha principal	Sistema de passagem do vaso	1 a 2 bar	2 a 3%
Válvula de controle de vazão na linha principal ou nas linhas individuais de injeção após o distribuidor	Instrumento de vazão mássica inserido na linha de transporte pneumático	1 a 2 bar	1 a 2% linha principal 0,5 a 1% linha individual

2.5 ESTAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO DA CSN

A estação de injeção é composta basicamente de dois vasos trabalhando em ciclos alternados, ou seja, enquanto um vaso está injetando o outro está se preparando para a injeção. Assim quando o vaso que está injetando atingir um peso mínimo, o vaso complementar que estava aguardando pressurizado assume a injeção de forma a garantir a continuidade do fluxo de carvão para o alto-forno.

A Figura 2.18 ilustra a visão em corte da estação de injeção de carvão pulverizado projeto Claudius Peters [4] instalado na CSN com seus principais:

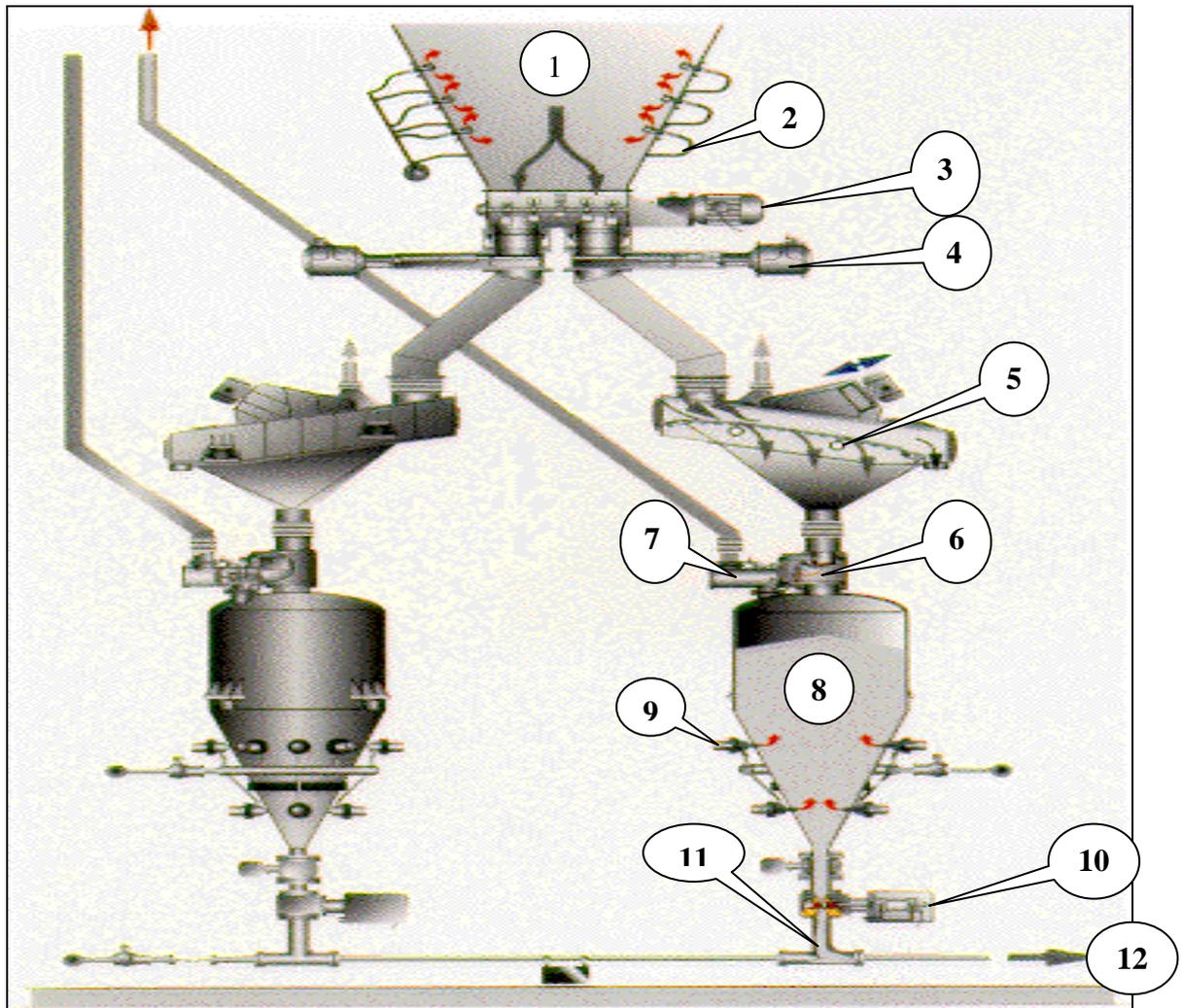


Figura 2.18 - Visão em corte da estação de injeção

- 1 - Silo de carvão pulverizado;
- 2 - Fluidizadores do cone do silo;
- 3 - Agitador;
- 4 - Válvulas de saída do silo de finos;
- 5 - Peneiras vibratórias;
- 6 - Válvula prato;
- 7 - Válvula de alívio;
- 8 - Vaso de injeção;
- 9 - Anel de fluidização do vaso de injeção;
- 10 - Válvula dosadora;
- 11 - Injetor de carvão;
- 12 - Linha principal de transporte pneumático do carvão.

A Figura 2.19 ilustra o projeto original da injeção de carvão pulverizado da CSN em 1997. Nota-se que as malhas de controle de pressão, nitrogênio de fluidização e transporte possuem somente um elemento final de controle (válvula de controle proporcional) para os dois vasos, pois elas somente estão em controle durante a fase de injeção do vaso.

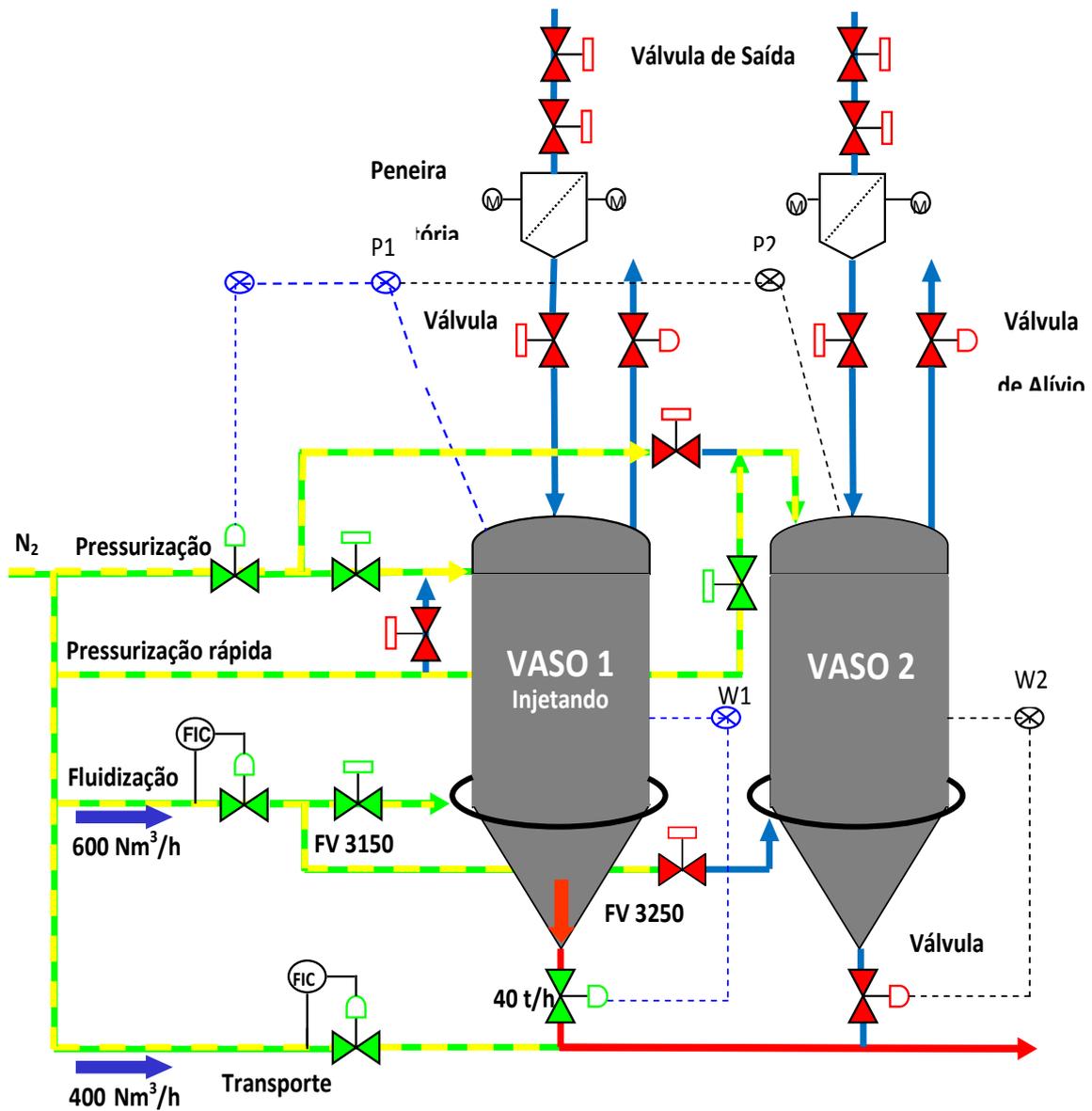


Figura 2.19 - Projeto original Claudius Peters para a CSN

A Figura 2.20 ilustra a tela gráfica do SDCD [15] usada atualmente na operação da estação de injeção de carvão pulverizado para o Alto-forno 2 incluindo o principal processo de injeção e transporte pneumático que serão os objetos de estudo desta tese.

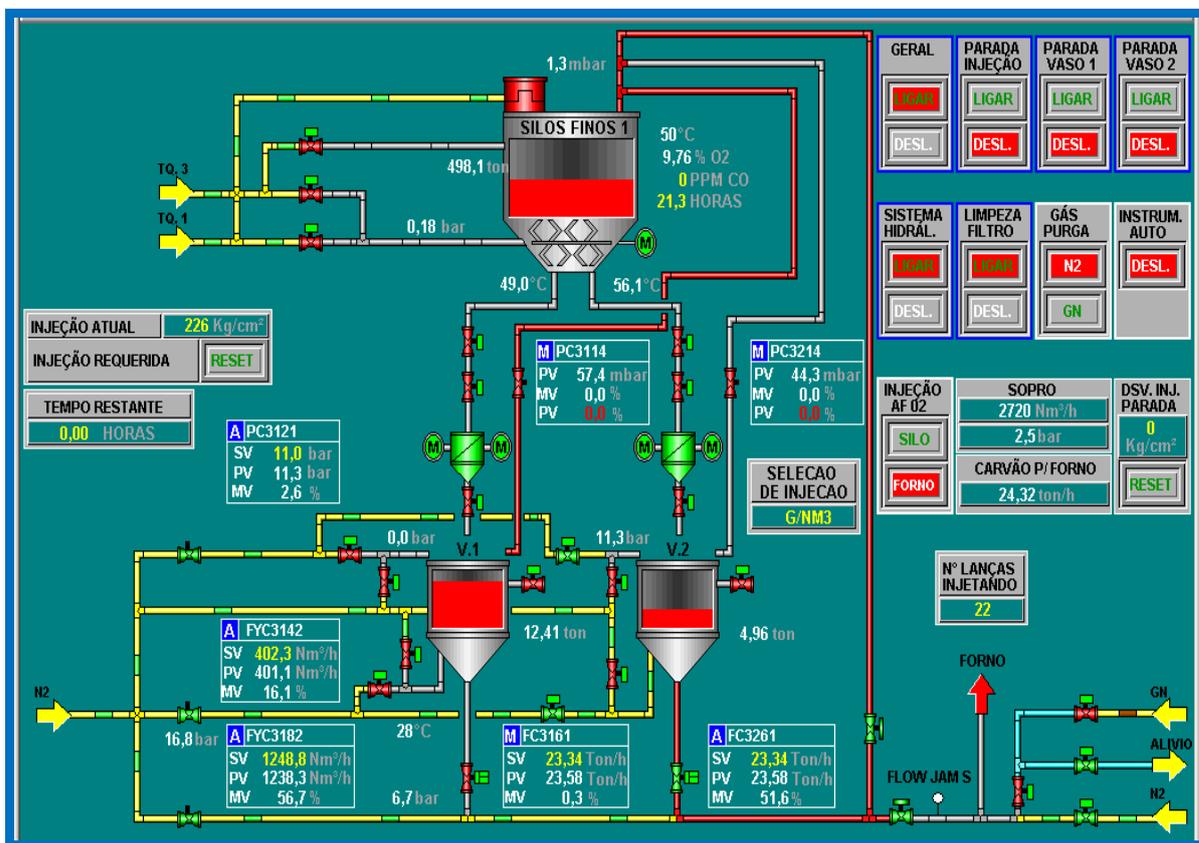


Figura 2.20 - Processo de transporte pneumático da estação de injeção do AF2

2.6 DESCRIÇÃO DAS QUATRO FASES ORIGINAIS DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO

Basicamente os dois vasos que contem o carvão no processo original da estação de injeção tinham quatro fases constituídas por intervalos de tempo distintos. O período de espera na fase de pressurização corresponde ao intervalo de tempo em que um dos vasos espera a sua vez na condição pressurizada, até que o outro vaso que está injetando carvão atinja o peso mínimo estipulado para a troca.

A Tabela 2.4 ilustra o ciclo de funcionamento do projeto original das 4 fases da estação de injeção: carregamento, pressurização, injeção e alívio do alto forno existente na CSN até julho de 2008, de acordo com a descrição funcional original do fabricante [4].

Fase	Nome	Descrição	Tempo típico
1	Carregamento	O vaso despressurizado é cheio com carvão pulverizado até 12 t.	420 s
2	Pressurização	O vaso de injeção é pressurizado com nitrogênio de pressão alta (17 bar) até a pressão de injeção.	180 s
3	Injeção	O carvão pulverizado do vaso é injetado para o alto-forno até atingir o peso mínimo de 2 t para a troca com o vaso oposto.	1100 s
4	Alívio	O vaso de injeção é aliviado gradativamente até zerar sua pressão, para uma nova fase de carregamento.	200 s

a - Fase de carregamento

O vaso está vazio, com sua válvula de alívio aberta o que significa que está despressurizado e inicia a abertura da válvula prato (ou de carregamento) que fica no topo do vaso. Em seguida a peneira de finos de carvão entra em operação e abre a válvula de fechamento do silo de estocagem do material. Neste momento, o agitador do silo de finos de carvão inicia operação e a fluidização, também na parte inferior do silo, é aberta. Ao completar esta seqüência, o vaso já está em enchimento, permanecendo até o vaso atingir o peso máximo programado de 12 t, quando o agitador para e a fluidização do silo é fechada. A peneira permanece por 30 s em operação para completar a sua limpeza e após este intervalo de tempo, a válvula prato é fechada.

b - Fase de injeção

No início da fase de injeção, o vaso está com aproximadamente 12 t de carvão pulverizado, com pressão adequada ao processo. As válvulas de alívio, prato e de pressurização estão fechadas. As válvulas de controle de vazão de fluidização, de pressão de injeção do vaso e a dosadora são abertas.

Quando peso do vaso de injeção de carvão pulverizado atingir 2 t, a válvula dosadora fecha e em seguida inicia a injeção de carvão pulverizado do vaso oposto.

A Figura 2.21 ilustra a base cônica dos vasos de injeção 1 e 2 do Alto-forno 2 (AF2), bem como as válvulas dosadoras e sua unidade hidráulica de comando.



Figura 2.21 - Vasos de injeção 1 e 2 do AF2

c - Fase de pressurização

A fase de pressurização inicia-se com o fechamento das válvulas prato e de alívio do vaso de injeção. Atingido a pressão de injeção necessária, a válvula de nitrogênio de pressurização rápida é fechada e o vaso está pronto para iniciar a fase de injeção de finos de carvão para o alto-forno. Ele ficará esperando o momento do início de injeção que se dará quando o vaso complementar que está injetando o material atingir o peso mínimo de 2 t.

d - Fase de alívio

Após o vaso atingir o seu peso mínimo de 2 t durante a fase de injeção, fecha-se a válvula dosadora e inicia-se a fase de alívio para despressurizar o vaso e permitir novo carregamento de carvão pulverizado.

A válvula de alívio é o elemento final de um controle de pressão em malha fechada. Este controlador de pressão impede que o vaso de injeção alivie de forma descontrolada para o silo de finos. A válvula de alívio procura manter uma pressão máxima constante de 0,6 bar em sua saída, para evitar danificar as juntas de vedação dos equipamentos.

A Figura 2.22 ilustra uma válvula típica de alívio do vaso de injeção.



Figura 2.22 - Válvula de alívio do vaso 4 do Alto-forno 3

Qualquer desenvolvimento que é efetuado para garantir ou aumentar a vida útil das borrachas de vedação das válvulas prato e alívio contribui para minimizar a variação de injeção de carvão, pois os maiores distúrbios do processo provêm de vazamentos através destas válvulas durante a fase de injeção quando o vaso está pressurizado. Diversos trabalhos [22] já estudam como detectar um vazamento em vasos de injeção de carvão pulverizado. A Figura 2.23 ilustra a válvula prato do vaso 4 do Alto-forno 3 (AF3).



Figura 2.23 - Válvula prato do vaso 4 do AF3

A válvula dosadora localiza-se logo abaixo do vaso de injeção e tem a finalidade de dosar a quantidade de carvão pulverizado. A válvula dosadora é o elemento final de controle da variável manipulada do controlador de vazão mássica de carvão pulverizado. A Figura 2.24 ilustra a válvula de dosagem de carvão do vaso 2 do AF3.



Figura 2.24 - Válvula dosadora de carvão pulverizado do vaso do AF3

A Tabela 2.5 ilustra o ciclo das injeções com as 4 fases distintas e a situação de suas principais válvulas.

Tabela 2.5 - Resumo das principais fases e a situação de cada válvula				
Fase	Carregamento	Pressurização rápida de 0 a 12 bar	Injeção	Alívio
Vaso Válvula	Vazio despressurizado	Cheio pressurizado	Cheio pressurizado	Vazio pressurizado
Válvula prato de abastecimento	Aberta fazendo o carregamento do vaso	Fechada	Fechada	Fechada
Válvula de alívio	Aberta	Fechada	Fechada	Iniciará sua abertura logo após fechar todas as outras válvulas
Válvula dosadora	Fechada	Fechada	Aberta em controle	Fechando logo assim que o vaso atingir nível mínimo
Fluidização	Fechada	Aberta	Aberta e em controle	Fechada

2.7 O ESTADO DA ARTE DA TECNOLOGIA IMPLANTADA

Os sistemas automáticos de controle de vazão de sólidos são especiais e complexos quando comparado aos controles de vazão de líquidos e gases. O sistema de injeção de vazão de carvão pulverizado para altos-fornos estão entre as mais famosas aplicações típicas para controle de sólidos na moderna indústria siderúrgica, bem como termoelétricas a carvão.

O principal item de controle para o processo do alto-forno com relação à injeção de carvão pulverizado é a estabilidade do fluxo na linha de injeção principal. Quanto mais estável o fluxo, melhor será a combustão e, portanto, a eficiência energética do carvão pulverizado e sua taxa de substituição por coque será melhor durante seu processo de queima no alto-forno.

Os sistemas de controle de vazão são geralmente baseados em controladores tipo PID realizados por um sistema digital de controle distribuído. A medição da vazão de sólidos é calculada por uma media móvel do decréscimo do peso do vaso no tempo numa taxa de aquisição constante ao longo do último minuto. Este é o estado da arte para a maioria das plantas de PCI no mundo.

O processo PCI tem uma estação de carvão pulverizado com dois vasos de injeção pressurizados trabalhando alternadamente de modo a garantir a vazão contínua e constante para o alto-forno. A técnica de medição de carvão pulverizado por célula de carga é uma medição direta porque não há sensor intrusivo na tubulação de transporte pneumático principal. Os vasos são apoiados em três células de carga que são conectadas a um conversor de sinal. Neste tipo de medição nenhum tipo de interferência mecânica pode ocorrer tais como rigidez mecânica da tubulação, apoio mecânico indevido, junta de expansão rígida, etc. tal como recomendado por Liptak [7].

Os vasos de injeção têm um sistema hidráulico especial com pesos padrão suportado por cilindros hidráulicos para permitir uma calibração periódica do transmissor de peso. O transmissor de peso tem uma resolução de +/- 5 kg numa escala de 15000 kg, fornecendo uma precisão menor do que +/- 0,03%. Seu sinal analógico de instrumentação é enviado ao SDCD e um algoritmo computacional subtrai o peso atual do peso de 6 s atrás para cálculo da vazão de carvão.

2.7.1 Malhas de controle da estação de injeção

Existem basicamente quatro malhas de controle que usam controladores tipo PID para controle das vazões e pressões do vaso de injeção:

- a - Vazão de nitrogênio de transporte;
- b - Vazão de nitrogênio de fluidização;
- c - Pressão constante do vaso;
- d - Vazão de carvão.

A Figura 2.25 ilustra as malhas de controle de vazão de transporte e fluidização, controle da pressão e o sistema de pesagem para controle da vazão de carvão pulverizado na linha de transporte pneumático principal.

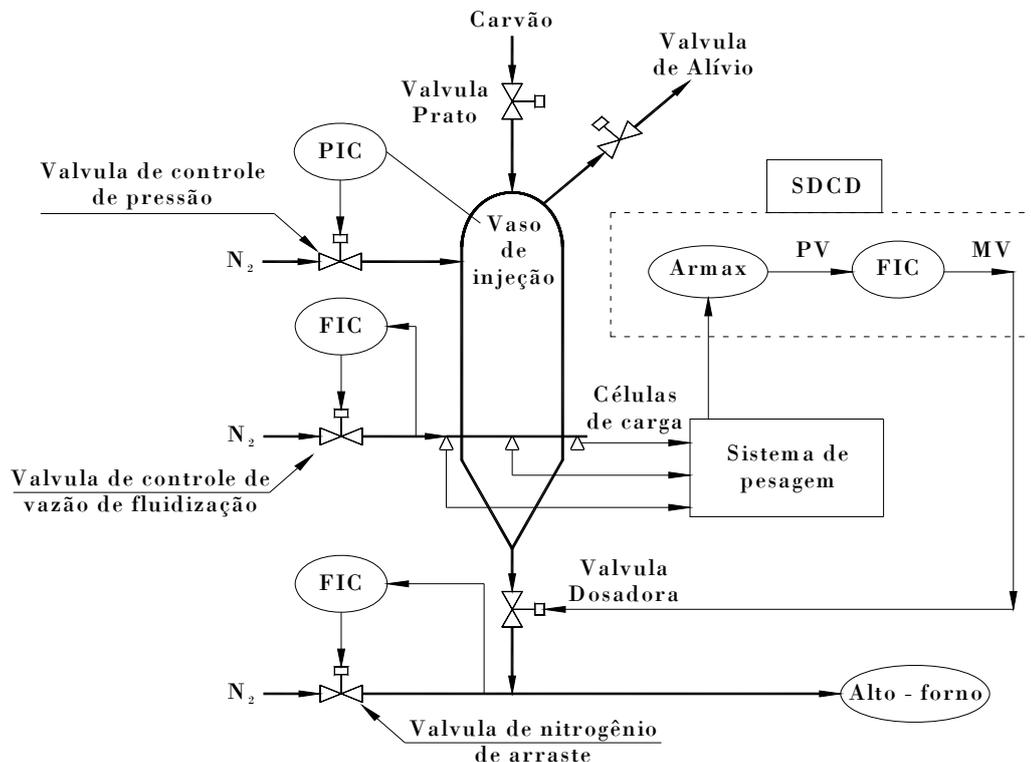


Figura 2.25 - Malhas de controle da estação de injeção

2.7.2 Controle da pressão dos vasos

Existe somente uma malha de controle composta de dois transmissores de pressão sendo um para cada vaso, porém somente uma válvula de controle para ambos visto que a malha só funciona para o vaso que está em fase de injeção, tal como no controle de vazão de fluidização.

2.7.3 Controle da vazão de carvão

A concepção da medição da vazão de carvão é baseada na variação do peso do vaso ao longo do tempo através de uma média móvel e um controlador PID normal. O controle da vazão de carvão injetado é feito pela variação de peso do vaso de injeção na unidade do tempo. O controlador de vazão atua na abertura da válvula dosadora localizada na saída do vaso de injeção em função do desvio entre a vazão de carvão pedida e a vazão real injetada.

2.7.4 Vazão de nitrogênio de transporte

O nitrogênio de transporte ou nitrogênio de arraste é responsável pelo transporte do carvão pulverizado. Ele cria uma pressão diferencial negativa em relação à pressão de injeção do vaso logo abaixo do injetor, ou "T". A Figura 2.26 ilustra a linha de nitrogênio de arraste de carvão pulverizado juntamente com a válvula dosadora.

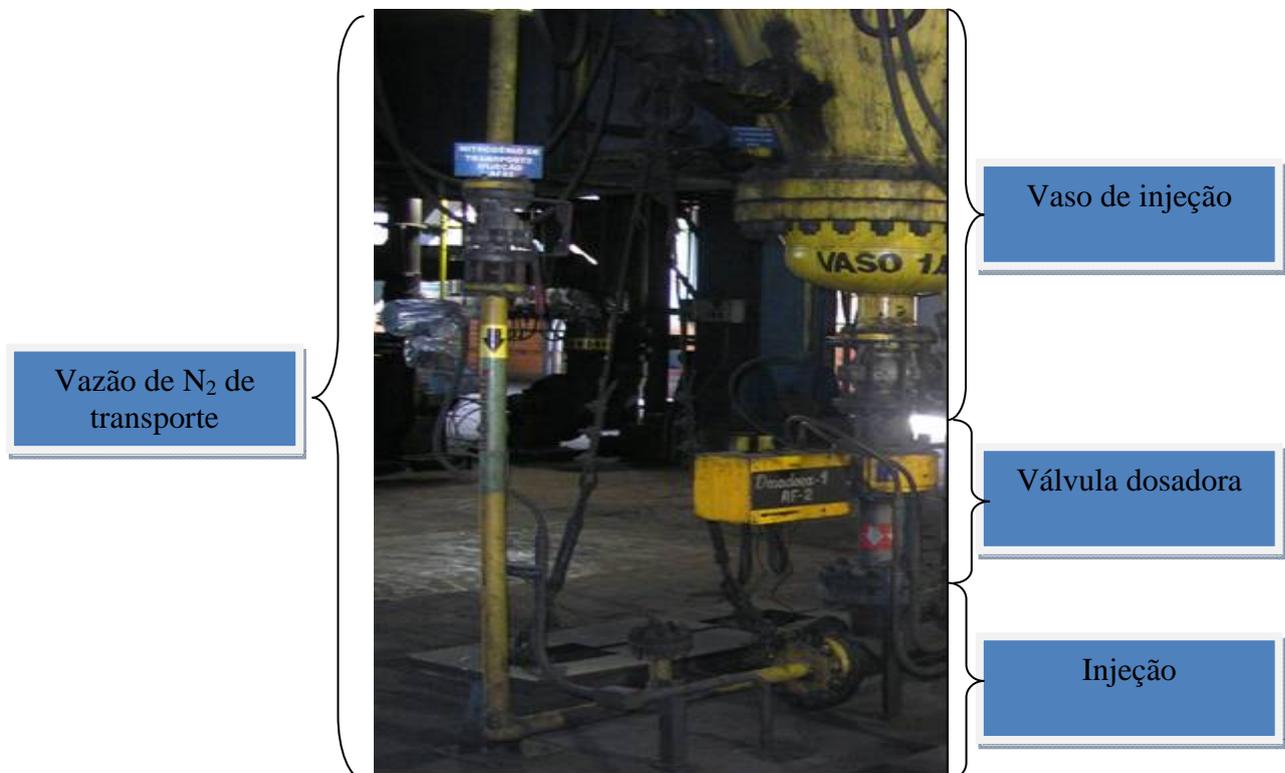


Figura 2.26 - Linha de nitrogênio de arraste de carvão pulverizado

2.7.5 Sistema de controle da vazão de fluidização

O objetivo desta malha de controle é manter uma vazão de nitrogênio constante no cone base do vaso de injeção para que se mantenha o fluxo de carvão que será enviado para o alto-forno.

O controle de vazão de fluidização é realizado por uma malha fechada no SDCD. Ele não é único para cada vaso, possuindo uma válvula de controle de vazão única e duas válvulas automáticas de fechamento individual para cada vaso.

O anel de fluidização do vaso de injeção é um “Manifold” circular ao cone base do vaso de injeção. Ele possui uma entrada de 2” com junta de expansão metálica e válvula de retenção para impedir fluxo reverso. O anel possui originalmente seis saídas ligadas em tubos flexíveis de alta pressão que alimentam os fluidizadores com filtros de bronze sinterizado de forma cilíndrica.

A Figura 2.27 ilustra o anel de fluidização no cone base do vaso de injeção onde se tem originalmente os seis fluidizadores distribuídos ao longo da geometria do cone. Estes fluidizadores com filtro de bronze sinterizado contribuem para a homogeneidade da zona de densidade baixa localizada no cone do vaso de injeção. De fato, esta zona de densidade baixa da mistura bifásica carvão/nitrogênio é criada pela vazão de nitrogênio de fluidização e quanto mais constante, maior será a estabilidade da vazão de carvão pulverizado.



Figura 2.27 - Anel de fluidização do vaso de injeção de carvão pulverizado

2.8 CONCLUSÕES PRELIMINARES

O sistema de injeção da Claudius Peters é um sistema simples e robusto que atende plenamente as necessidades operacionais dos altos-fornos existindo cerca de 200 instalações no mundo com a mesma tecnologia. Este sistema é conhecido como vasos gêmeos paralela sendo uma das versões de processo PCI mais econômica e funcional na indústria siderúrgica nos dias de hoje.

A maioria das empresas de siderúrgica com novos investimentos entre 1990 e 2010 sempre tem optado por PCI com distribuidor estático. A constante evolução da estação de injeção de carvão pulverizada e as tecnologias de base são a motivação para a execução deste trabalho de tese.

Capítulo 3

Critérios para Avaliação da Variação Instantânea da Vazão de Carvão Pulverizado para os Altos-fornos

3.1 OBJETIVO

O objetivo capítulo é conhecer os critérios e valores típicos para avaliação das variações da vazão de carvão pulverizado para os altos-fornos. Estas avaliações são usadas como índices de desempenho do controlador de vazão de injeção tal como descrito no livro sobre de controle de processos de Bishop [29].

Foram desenvolvidas ferramentas computacionais em tempo real no SDCD para calcular a quantidade injetada, o desvio acumulado, a média e o desvio padrão similar a Spiegel [30] porém de modo discreto e gerar histogramas probabilísticos de dispersão Gaussiana como em Bussabe e Morentin [31] para medir as variabilidades e então realimentar os resultados nos controles da vazão de carvão a curto e a longo prazo.

3.2 CONSIDERAÇÕES SOBRE VARIAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO

O PCI tem seu desempenho de precisão de injeção medido basicamente através de três tipos diferentes de variação de injeção de carvão:

- Integral do erro: **IE** é o desvio (SP-PV) acumulado no tempo;
- **Variação instantânea** de carvão: e o desvio percentual instantâneo: $(SP-PV) / SP \times 100\%$;
- **Distribuição** uniforme entre lanças: é a mesma quantidade de fluxo de injeção de carvão nas lanças.

A Figura 3.1 ilustra como a variação de injeção de carvão pode ser interpretada pelos fabricantes e literaturas.

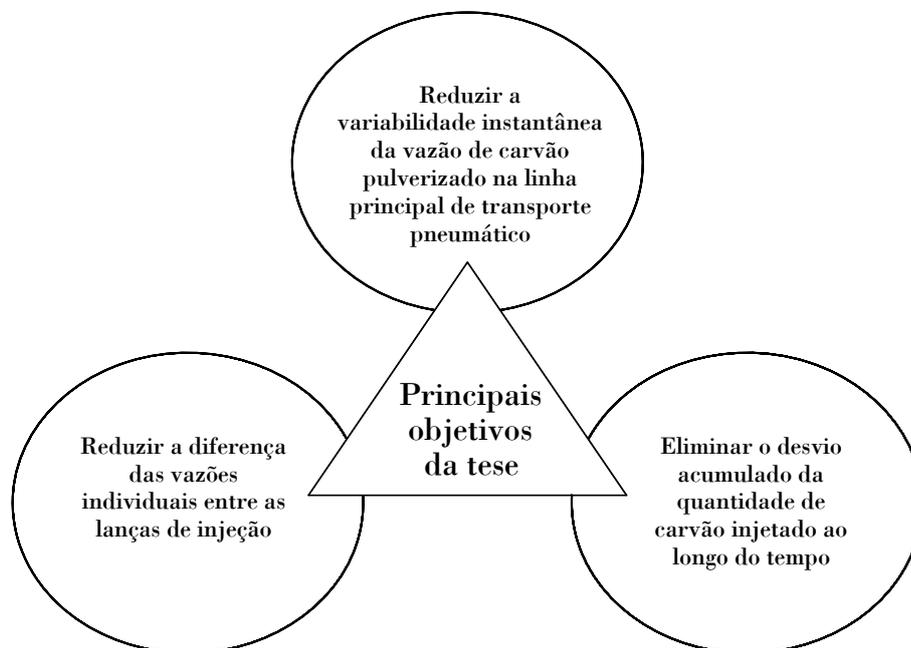


Figura 3.1 - Tipos de variação de injeção de carvão

Para PCR elevado (> 200 kg/t) segundo diversas literaturas [2], Nippon Steel Corporation [32], Takano [33], Okochi et alli [34], Weiser et alli [35] e Oliveira e Manetta [36], é necessário que os três itens anteriores sejam plenamente atendidos nos seguintes valores:

- $IE \leq \pm 200$ kg ao longo de todo período de injeção;
- Variação instantânea $\leq \pm 5\%$;
- Distribuição $\leq 5\%$ entre lanças.

No sistema, em análise anterior ao desenvolvimento do controle de processo, nenhum dos três itens anteriores era atendido em sua integridade e eles são os principais itens relativos a PCI para que os quesitos de produção de ferro-gusa em qualquer alto-forno com qualidade boa, ou seja, baixo desvio padrão do teor de silício e enxofre.

Por outro lado, a **variação instantânea** na vazão de carvão afeta principalmente as malhas de controle de vapor e oxigênio do alto-forno cujos “set-points” são colocados em cascata com a taxa de injeção real. Os resultados obtidos envolvendo 70% do tempo de amostragem de 8h (eventualmente pode ser adotado outro valor), a variação instantânea ficava dentro da faixa de $\pm 5\%$, o que fornecia um desvio padrão de aproximadamente 1,5 t/h, quando a taxa de injeção média estava em 30 t/h. A medida que a taxa de injeção aumenta, o percentual de tempo em que a variação instantânea se encontra dentro da faixa de ajuste ótimo tende a aumentar.

Na distribuição uniforme o PCI do sistema em análise envolvia um distribuidor estático assegurando um desvio percentual entre lanças de no máximo 5%. Os sistemas PCI que possuem medidores individuais de vazão de carvão por lança juntamente com válvulas de gás de influência (N_2/O_2) perfazendo malhas de controle que prometem valores menores, porém com custos (operacional, manutenção e instalação) que não ficam associados ao processo e, portanto, o retorno financeiro não é simples de ser calculado. Usualmente, para medição desta distribuição, são inseridos quatro medidores de taxa de carvão em lanças equidistantes. Ainda, para assegurar uma distribuição uniforme, os comprimentos dos tubos ligando o distribuidor de carvão às lanças tem o mesmo comprimento.

Existem vários métodos e técnicas descritas nesta tese e usadas no dia-a-dia para se obter uma distribuição uniforme de vazão de carvão pulverizado ao redor de um alto-forno, conforme será visto melhor no Capítulo 5.

Quanto mais equilibrada e constante for a distribuição da vazão de carvão, melhor será a eficiência de combustão no “Raceway”. Por consequência, a taxa de substituição de carvão por coque será maior.

A Tabela 3.1 classifica os métodos industrialmente usados para efetuar uma distribuição uniforme de carvão ao redor das ventaneiras do alto-forno, bem como o resultado esperado para a precisão na diferença de vazão entre lanças.

Tabela 3.1 - Métodos de controle estático das vazões de carvão pulverizado			
Métodos de controle da vazão	Padrão de distribuição	Perda de pressão devido ao controle	Precisão alcançada
Balanceamento do diâmetro interno da linha de transporte pneumático.	Uniforme e constante	Não há	~ 5%
Equalização das resistências à vazão das linhas devido a comprimentos e curvas.	Uniforme e constante	Não há	~ 4%
Equalização das resistências á vazão somando a bocais de vazão subcríticos.	Uniforme e constante	Aproximadamente de 1 a 2 bar	~ 3%
Balanceamento das linhas, equalização das resistências e uso arbitrário de bocais críticos.	Pode ser arranjado de acordo com as necessidades operacionais do alto-forno.	Somente 65% da pressão de entrada sai na saída	~ 2%

A vazão de carvão pulverizado numa tubulação de transporte pneumático em fase densa depende de fatores fixos e fatores variáveis que por sua vez podem ser usados na malha de controle de vazão principal. Os fatores fixos podem ser usados para um controle fixo e estático visando a equalização nas vazões de carvão distribuídas ao redor de todos os algaravizes do alto-forno.

Para tal pode-se:

- Equalizar os comprimentos das derivações das linhas de transporte pneumático após o distribuidor;
- Equalizar os diâmetros internos das linhas de transporte pneumático;
- Elemento primário da vazão (Venturi) para queda de pressão e equalização das vazões de carvão com bocal de expansão subcrítica;
- Elemento primário de vazão (bocal de expansão crítica) para equalizar as vazões de carvão após o distribuidor.

Os fatores variáveis podem ser usados na malha de controle de vazão de carvão:

- Pressão de entrada da linha de transporte pneumático;
- Pressão de saída da linha de transporte pneumático;
- Vazão de gás de transporte;
- Válvula de controle de vazão em série;
- Velocidade da Válvula de controle tipo válvula rotativa.

3.3 O EFEITO DA VARIAÇÃO DE CARVÃO NO ALTO-FORNO

A injeção de carvão pulverizado e o alto-forno são processos contínuos e não de bateladas. Nesta tese foram definidos novos critérios para efetuar a avaliação da variação da vazão de injeção de carvão pulverizado instantânea injetada nos altos-fornos envolvendo as faixas de tolerância para operação normal do alto-forno e as ferramentas estatísticas necessárias para a monitoração da vazão instantânea de carvão e o desvio acumulado no tempo. As análises são efetuadas em tempo real e armazenadas periodicamente pelo próprio sistema de controle do PCI. Estes registros da variabilidade foram desenvolvidos com a finalidade de obter uma ferramenta matemática para verificar o desempenho das melhorias do sistema em análise e gerar novas variáveis de processo para controle.

A vazão de carvão injetada para a queima nas ventaneiras tem que ser a mais constante possível para assegurar a estabilidade da cinética das reações de combustão, preservando seu equilíbrio estequiométrico da bolsa de ar (“Raceway”) dos altos-fornos.

Quando se injeta em taxas elevadas de carvão (> 200 kg/t) a sua distribuição uniforme nas ventaneiras bem com a variabilidade da vazão influencia na estabilidade do processo alto-forno porque cada desvio do set-point da taxa de injeção significa uma redução na taxa de substituição, ou seja, um desperdício de uma parte do carvão ou oxigênio injetado e não queimado.

A vazão de carvão pulverizado é uma variável estocástica advinda de um processo industrial contínuo. Para analisar a variação desta grandeza ao longo do tempo deve-se lançar mão de ferramentas básicas do controle estatístico de processos. Estas ferramentas desenvolvidas por fabricantes de sistema de controle de alto-forno, não traziam resultados adequados e os operadores destes equipamentos tinham grandes dificuldades em estabilizar o processo, o que por vezes acarretava em perda de produção e principalmente na qualidade do ferro-gusa. Para evitar estes inconvenientes foi desenvolvida uma ferramenta em tempo real para análise da variabilidade da vazão de carvão em longo prazo (a cada 8h) e para diagnosticar defeitos tais como vazamentos nas válvulas prato e alívio.

Durante este período de análise, são obtidas 480 amostras da vazão de carvão a cada 60 s para efetuar os cálculos de média e desvio padrão de forma acumulativa no SDCD. A apresentação dos resultados foi desenvolvida através de histogramas probabilísticos da variabilidade da vazão de carvão.

Quanto menor o erro de regime permanente, ou seja, a diferença entre os valores SP e PV do controlador, melhor será a injeção de carvão pulverizado. Idealmente, o valor do erro deveria ser nulo ($SP = PV$) durante todo o tempo de injeção. Porém, isto não acontece na prática devido a precisão dos medidores, princípio de medição, interferências eletromagnéticas e as descontinuidades (ruídos) nas variáveis de processo que influenciam na vazão resultante de carvão pulverizado através da válvula de dosagem.

O erro de regime permanente (e_{ss}), de uma malha de controle genérica (vide [29] e [37]) normalmente variam entre 2 a 5% e o valor de referência utilizado na prática para análise do desempenho do controle de processo visando tornar a vazão de carvão o mais estável possível e tolerado pelo alto-forno é de $\pm 5\%$. Todavia, a observação em campo mostra que ao utilizar este valor, o sistema não tem a precisão esperada durante 100% do período de injeção.

3.4 MEDIDA DA VARIABILIDADE DA VAZÃO DE CARVÃO

Os critérios de integrais de erro (**IE**) que são normalmente utilizados para avaliar o desempenho da malha de controle não descrevem sua variabilidade instantânea, pois a soma dos erros existentes naturalmente na medição dos sinais de interesse não representam a instabilidade do processo por conter variações ficando ora acima e ora abaixo do valor de referência. Logo, o resultado do valor acumulado ao longo do tempo não representa a variabilidade instantânea da vazão de carvão e, portanto, cada índice deve ser usado separadamente para seus respectivos controles avançados.

A variação percentual de carvão exprime um valor que representa a diferença entre os valores medidos (PV) e o valor de referência (SP ou SV) que é conhecido. O desvio (DV) percentual ou variação percentual instantânea de vazão de carvão ou ainda, o próprio erro de regime é calculada conforme Equação (3.1):

$$\text{Variação percentual \%} = \text{DV\%} = \frac{\text{SV} - \text{PV}}{\text{SV}} \times 100\% \quad (3.1)$$

Onde:

SV: Valor definido de vazão de carvão para o processo;

PV: Valor atual da vazão de carvão medida pelo decréscimo do peso do vaso;

DV = SV-PV: Desvio atual da vazão de carvão pulverizado injetado.

Os gráficos de tendência normalmente retratam a evolução de determinadas grandezas de interesse ao longo do tempo, todavia, a quantificação da variabilidade não é possível de ser feito de modo consistente, pois depende da escala das variáveis que são utilizadas. Além disso, a análise é subjetiva por retratar a evolução do processo sem quantificá-los matematicamente.

Neste trabalho foram criados três gráficos em tempo real, tais como o da Figura 3.2 a seguir, cuja escala de tempo mínima utilizada foi de 3 minutos, ou seja, este mesmo gráfico pode ser estendido em no máximo três dias devido a capacidade de armazenagem de dados do SDCD para cada uma das três estações de injeção. Desta forma é possível analisar a variação de injeção em tempo real durante a troca de vasos (3 minutos) e também a cada 8 h (longo prazo) para se ter uma noção geral do desempenho da estação de injeção por vaso.

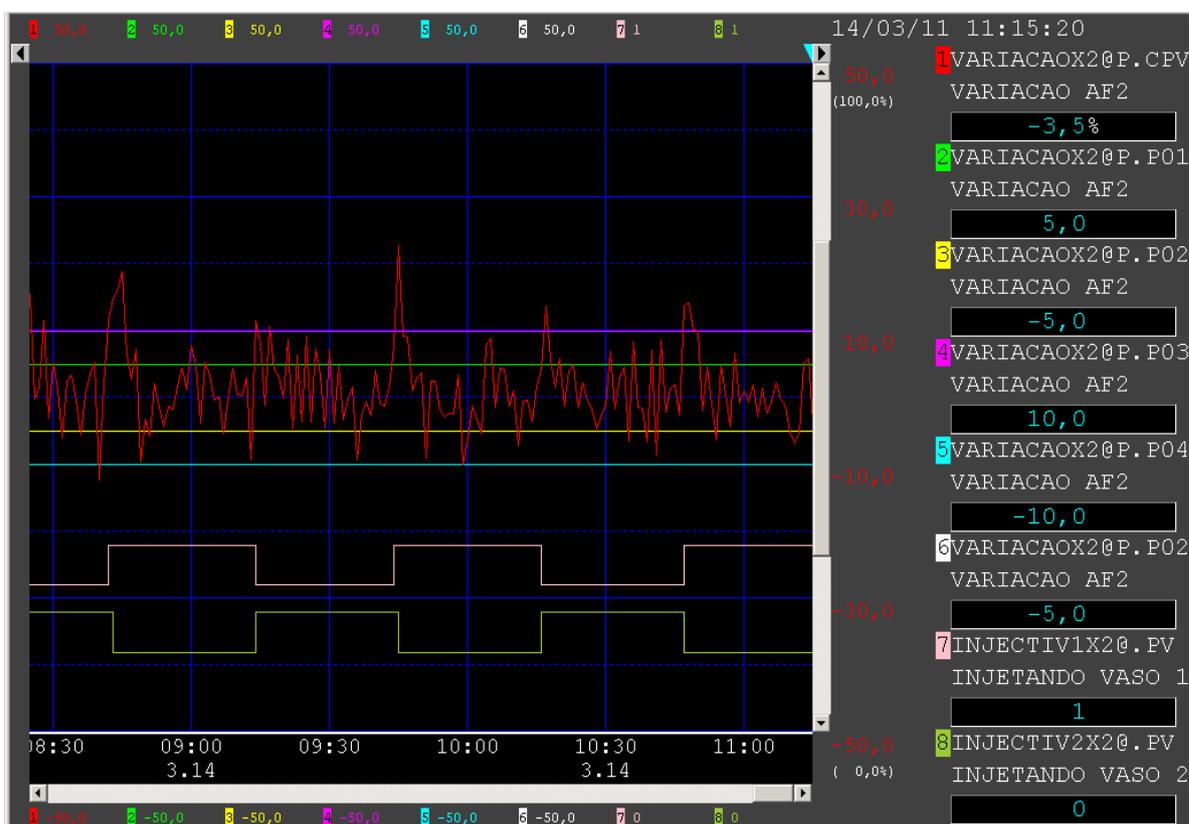


Figura 3.2 - Variação percentual instantânea da vazão de carvão

Foram adicionados em cada um dos três gráficos de tendência, faixas com valores fixos em +5% e - 5% que criam referências com relação ao desvio percentual calculado real e inserido (“plotado”) no mesmo gráfico a longo prazo (3 dias) para se localizar os momentos em que a variação de injeção saiu fora da faixa considerada boa. A variabilidade menor ou igual a $\leq \pm 5\%$ é o parâmetro a ser determinado, pois as taxas de injeção elevadas de carvão requerem dos sistemas um desempenho específico visando a melhor precisão possível.

3.5 DEFINIÇÕES DAS FAIXAS DE CONTROLE DE QUALIDADE

Foram definidas três faixas de controle de qualidade para avaliar qual é a variação de injeção de carvão durante a operação do alto-forno. Assim sendo, foi estabelecida como meta ideal que o erro (e_{ss}) da vazão de injeção de carvão pulverizado (primeira faixa) deverá ficar entre $\pm 5\%$. A segunda faixa ficou entre +5% a +10% e entre -5% a -10%. A terceira faixa, acima de +10% e abaixo de -10%. O analisador desenvolvido neste trabalho feito através de cinco temporizadores determina qual é o intervalo de tempo, a cada 8h, que a variável de interesse fica na segunda e na terceira faixas. Naturalmente a grandeza de interesse deverá permanecer durante o maior intervalo de tempo possível dentro da primeira faixa. A Tabela 3.2 a seguir ilustra as faixas que foram definidas.

Os cinco temporizadores do controle de qualidade são ligados ou desligados através da lógica de controle que foi implementada no SDCD quando o desvio percentual entra ou sai fora das faixas estipuladas. No final do espaço amostral, a média e o desvio padrão são então calculados e o histograma é armazenado para comparações futuras.

Tabela 3.2 - Faixas de avaliação da variação de vazão de carvão		
	Definição da Faixa	Desvio percentual instantâneo
Negativa	Ruim	$DV\% \leq - 10\%$
	Regular	$- 5\% \leq DV\% > - 10\%$
	Boa	$DV\% > - 5\%$
Positiva	Boa	$DV\% < + 5\%$
	Regular	$+ 5\% \geq DV\% < + 10\%$
	Ruim	$DV\% \geq + 10\%$

3.6 HISTOGRAMAS DE DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL

Um dos resultados da ferramenta de análise, resultado deste trabalho, são os histogramas de distribuição amostral da variação da vazão de injeção de carvão pulverizado para cada uma das três estações obtidos conforme ilustra a Figura 3.3:

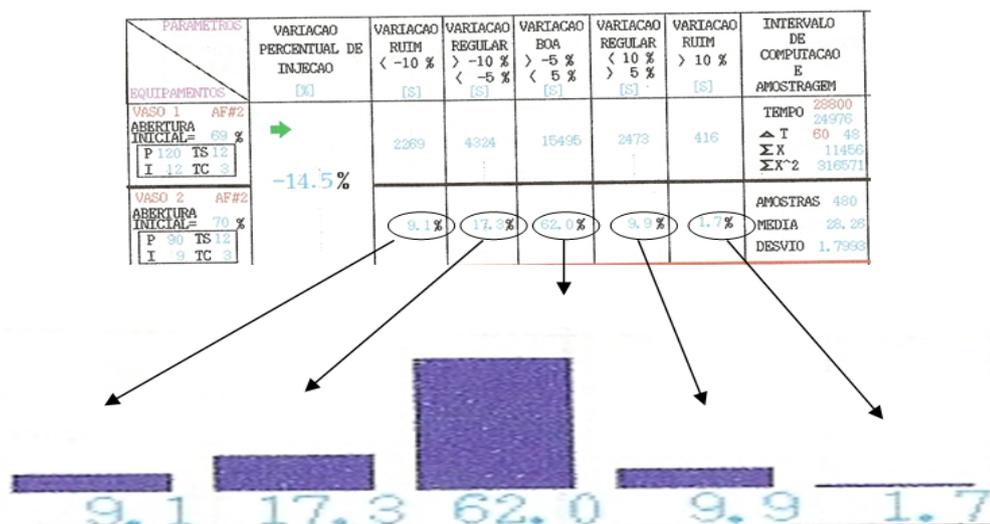


Figura 3.3 - Histograma de distribuição amostral da vazão de carvão

No final de 8h, os histogramas resultantes compostos de cinco barras são armazenados e colocados na memória do SDCD, organizada no modo comumente denominado “First in Last Out” (FILO), ou seja, os primeiros dados que são armazenados na memória referentes ao primeiro intervalo de amostragem de 8h são movidos para a posição de memória seguinte e os últimos dados são descartados.

Cada barra do histograma representa o percentual de tempo em que a variação da vazão de injeção de carvão permaneceu dentro de cada faixa de controle definida pela Tabela 3.1 e explicitado na Figura 3.3. Cada resultado do histograma (por exemplo: 9,1%; 17,3%; 62%; 9,9% e 1,7%) representa o percentual que a vazão ficou dentro de cada uma das três faixas definidas na Tabela 3.1 onde o resultado é considerado adequado na faixa indicada como “**variação boa**”.

Caso o índice de variação identificada como “boa”, fique inferior a 60% deve-se interferir no processo identificando as causas dos desvios para que possam ser sanados normalmente devido a vazamento nas válvulas prato e alívio. Este valor de 60 a 65 % de variação é típico, histórico (registrados de 2001) e tem sido observado em outros sistemas PCI como [26] e [27] além de [4].

A Figura 3.4 a seguir ilustra o resultado final da análise em tempo real (“on-line”) da variação instantânea da vazão de carvão pulverizado para as três estações de injeção em 2008. Observam-se também a memória dos histogramas de três espaços amostrais anteriores para análise do desempenho de mudanças na estratégia de controle.

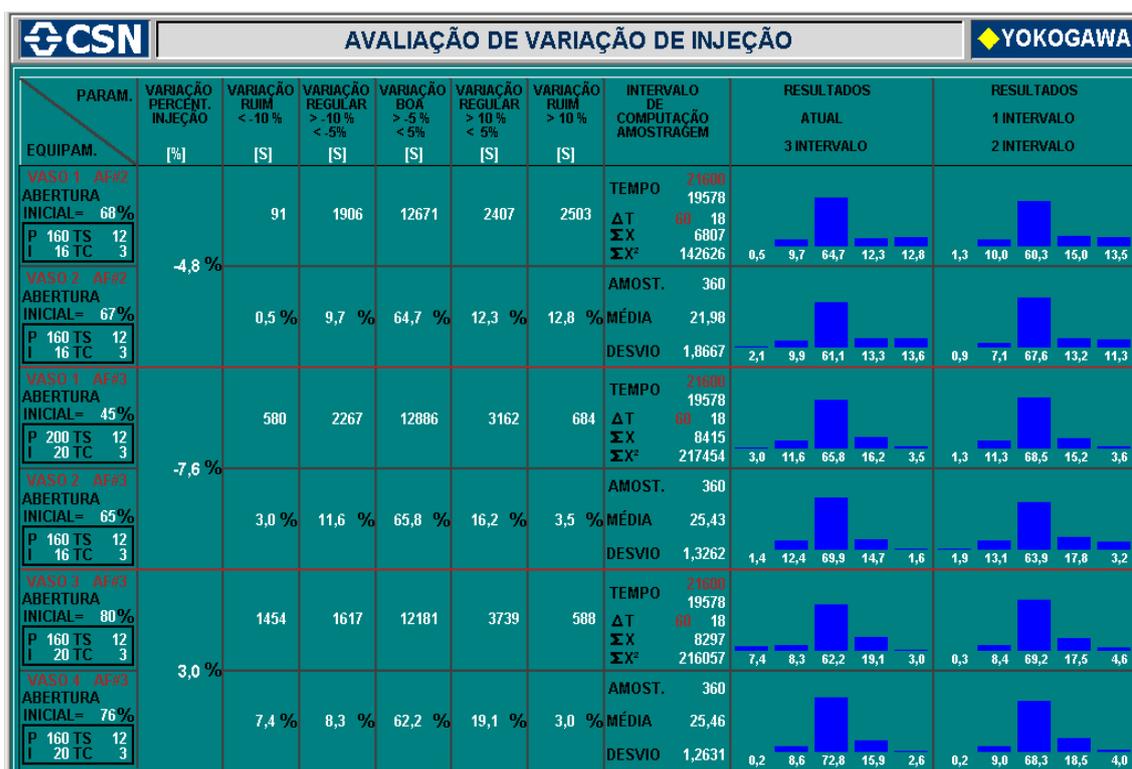


Figura 3.4 - Análise da variabilidade da vazão de carvão pulverizado em tempo real

Os valores de ajuste dos controladores de vazão de carvão foram colocados nesta tela para o gerenciamento das ações e coleta de resultados das novas estratégias de controle. O valor da abertura inicial da válvula dosadora a ser visto no capítulo 10 também é colocado nesta tela.

Nota-se que a medida que a vazão de carvão aumenta, o desvio padrão diminui, pois o acerto da válvula dosadora e do controlador melhora percentualmente.

3.7 CONCLUSÕES PRELIMINARES

Os resultados obtidos pelo analisador de variação instantânea de vazão de carvão foram adequados, pois, as duas estações de injeção do AF3 que contém equipamentos diferentes, porém com processos similares chegaram praticamente a mesma média, ou seja, a estação AF3.1 ficou em 35,92 t/h enquanto a estação AF3.2 atingiu 35,95 t/h, porém com desvios padrão diferentes.

Quando ocorre um problema de controle do vaso de injeção tais como vazamentos e falhas no sistema hidráulico das válvulas de dosagem de carvão, ou ainda no sistema de transporte pneumático, vazão e pressões de controle, a vazão final de carvão pulverizado na linha principal para o alto-forno é afetada.

Este analisador também foi implantado em outras siderúrgicas com o mesmo tipo de controle e os resultados também ficaram dentro do esperado (60 a 65%).

Verificou-se que o sistema que se encontrava implantado, típico de outras plantas, é normalmente ofertado para as empresas como apresentando erros de desvios instantâneos de 2 a 4%. Isto significa que durante 100% do tempo o erro percentual do desvio a cada instante deverá estar dentro desta faixa. As observações feitas antes da implementação identificaram que os erros eram, na planta analisada, superiores a 8% e em alguns instantes atingindo 20%, o que desestabilizava o processo.

Os resultados mostram que em apenas cerca de 90% do tempo, o valor de e_{ss} ou do desvio percentual instantâneo (DV%) é menor que 10%, ou seja, muito pior do que o anunciado pelos fornecedores de sistemas PCI estudados nesta tese.

Capítulo 4

Seqüência Lógica e Intertravamentos de Segurança

4.1 EXPANSÃO DA CAPACIDADE NOMINAL DE VAZÃO

Este item apresenta a parte da tese que propiciou aumentar a capacidade nominal de cada estação de injeção de carvão pulverizado passando de 40 para 50 t/h (aumento de 25%), bem como redução do valor mínimo de 20 para 10 t/h.

Antes da alteração descrita em Motta [19], o projeto original previa injetar um máximo de 200 kg de carvão para cada tonelada de ferro-gusa produzido nos Altos-fornos 2 e 3 cujas produções eram de 4500 e 9500 t respectivamente por dia.

Para cumprir este objetivo, foi necessário realizar a modelagem e medição dos intervalos de tempo gastos por cada fase de injeção de cada vaso das estações do PCI, além de equipamentos adicionais, novas malhas e estratégias de controle, e a faixa de ajuste do pedido de injeção foi aumentada de 20 a 40 t/h para 10 a 50 t/h, o que exigiu novos “face plates” para os instrumentos de controle de vazão de transporte e fluidização e expansão dos calculados do transporte pneumático.

A queda de injeção é o **pio**r tipo de variação de vazão de carvão, pois afeta a quantidade injetada a longo prazo e instantaneamente.

As conseqüências de uma queda de injeção, ou interrupções no fluxo de carvão injetado no alto-forno são a redução do ritmo de produção, apagamento das caldeiras da CTE, entupimento de lanças de injeção de carvão e principalmente instabilidades nas malhas de controle de vazão de vapor e oxigênio com conseqüente instabilidade no alto-forno levando a arriamento de carga e chaminé.

4.2 CAPACIDADE DE INJEÇÃO DO PCI

O processo de compreensão do Sistema de Injeção de Carvão Pulverizado PCI envolve dois conceitos: o do PCR e o da taxa de injeção de carvão.

O termo “Pulverized Coal Rate (PCR)” corresponde à taxa de carvão pulverizado do alto forno necessário para fabricar uma tonelada de ferro-gusa. Ela compõe uma das parcelas da taxa de combustível total (“FUEL RATE”) gasto para se fazer uma tonelada de gusa e atende a seguinte expressão:

$$\text{PCR} = \text{CP}/\text{TG} \quad (4.1)$$

Onde:

CP: Capacidade nominal de injeção de carvão expressa em fluxo t/h ou em quantidade em t;

TG: Produção atual de ferro-gusa do alto-forno em fluxo t/h ou em quantidade em t.

Assim sendo, o projeto PCI é especificado em função do PCR nominal de 200 kg/t para as produções de 4500 t/dia para o AF2 e de 9500 t/dia para AF3.

Por outro lado, a vazão de carvão pulverizado é a quantidade em toneladas por hora que os sistemas de injeções devem ser capazes de atingir o PCR nominal necessário para o alto-forno, conforme Expressão 4.2.

$$\text{CP} = \text{PCR} * \text{TG} \quad (4.2)$$

O projeto original previa para o AF2 uma estação de injeção de 37,5 t/h com tempo de espera de 2,9 min e para o AF3 duas estações com capacidades de 39,5 t/h, totalizando 79 t/h, com tempo de espera de 2,1 min, sendo que o tempo de espera é um intervalo necessário para assegurar a continuidade da vazão de carvão. Nos caso tem-se:

$$\text{CP do AF2} = (200) * (4500/ 24) = 37,4 \text{ t/h}$$

$$\text{CP do AF3} = (200) * (9500/ 24) = 79,1 \text{ t/h}$$

4.3 CAPACIDADE MÁXIMA DE INJEÇÃO

A vazão de carvão nominal é a máxima vazão na qual a continuidade da vazão de carvão do sistema é garantida. Isto acontece no instante em que o vaso que acabou de injetar o carvão coincide com o fim da fase de pressurização do vaso oposto. Isto significa que o tempo de espera do vaso oposto foi zero.

Assim, de acordo com a Equação (4.3), quando o tempo de injeção for mínimo a vazão de carvão será máxima.

$$C P_{\text{máx}} = \lim_{T_I \rightarrow \min} = \frac{\text{SPAN do vaso}}{T_I} \quad (4.3)$$

Onde:

C P_{máx}: Capacidade máxima da vazão de carvão em t/h;

T_I: tempo mínimo de injeção que será igual ao tempo de preparo do vaso oposto, para garantir a continuidade da injeção;

SPAN do vaso: P_{máx} - P_{mín};

P_{máx}: Peso máximo do vaso de injeção (valor típico 12 t);

P_{mín}: Peso mínimo do vaso de injeção (valor típico 2 t).

O tempo de injeção é dado em função dos tempos das fases de preparo do vaso oposto de acordo com a Expressão (4.4) definida a seguir.

$$T_I = T_A + T_C + T_P + T_E \quad (4.4)$$

Onde:

T_A: Tempo de alívio da pressão interna do vaso em s;

T_C: Tempo de carregamento com carvão fino em s;

T_P: Tempo de pressurização do vaso em s;

T_E: Tempo de espera do vaso oposto em s;

T_I: Tempo de injeção em s.

A máxima capacidade ocorrerá quando o tempo de injeção for igual ao tempo gasto para o outro vaso se preparar. No limite, quando T_E tender a zero (T_E = 0), tem-se o tempo mínimo de injeção (T_I = T_I mínimo). Levando (4.4) em (4.3) obtêm-se a Expressão (4.5):

$$T_{I\min} = T_A + T_C + T_P \quad (4.5)$$

Onde:

T_{Imin}: Tempo de injeção mínimo quando o tempo de espera do vaso oposto é nulo.

Aplicando-se (4.5) em (4.3) obtém-se a Equação (4.6) que exprime a capacidade máxima de injeção do vaso em função do SPAN do vaso e do tempo mínimo de injeção sem que haja interrupções na vazão de injeção da estação:

$$C_{Pmáx} = \frac{\text{SPAN do vaso}}{T_{Imin}} \quad (4.6)$$

Esta equação foi implementada no SDCD e é efetuada em tempo real fornecendo a capacidade nominal da estação de injeção por vaso em t/h.

4.4 ESTRATÉGIA DA EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE INJEÇÃO

Durante o desenvolvimento da tese procurou-se atingir as fases de injeção, carregamento e pressurização, nesta ordem de magnitude com relação a redução dos intervalos das fases do processo.

A fase de alívio tem que ser conservada constante, pois interfere com a vida útil da borracha de vedação (sede) da válvula de alívio. A placa de orifício de pressurização não pode ser aumentada devido à instabilidade gerada na rede de nitrogênio durante a pressurização do vaso. A peneira não pode ser pressurizada, pois ocorrem vazamentos como consequência e sua amplitude e frequência de peneiramento têm que ser conservadas de projeto para preservar a estrutura.

De acordo com o exposto anteriormente, para aumentar a capacidade de injeção de carvão pulverizado em t/h, tem-se que, a princípio, tomar as ações mostradas na Tabela 4.1, a seguir:

Tabela 4.1 - Ações tomadas para expandir a capacidade de injeção	
Fase	Intervalo de tempo
Alívio	Manter Constante
Carregamento	Diminuir
Pressurização	Diminuir
Injeção	Aumentar

4.4.1 Fase de carregamento dos vasos

As ações tomadas na fase de carregamento dos vasos para aumento da capacidade nominal de injeção envolveram:

- O aumento do orifício da placa de carregamento de 117 para 125 mm;
- Implantação de dois modos de operação distintos para a fluidização dos silos de finos: constante e alternada;
- Implantação do controle de pressão constante para a fluidização do silo de finos com a inclusão de um transmissor e válvula de controle de pressão;
- Inclusão de uma válvula pneumática visando permitir que a válvula de alívio de pressão do vaso possa fechar rapidamente.

A Figura 4.1 ilustra o diagrama pneumático da válvula direcional de duas vias foi implantada após a alimentação pneumática do atuador em série com o posicionador pneumático para fechamento rápido da válvula de alívio. Após sua desenergização, a depressurização do atuador ocorre de forma mais rápida, reduzindo o tempo de fechamento da válvula de alívio de 30 para 4 s conforme medido na tela gráfica da Figura 4.1 à frente.

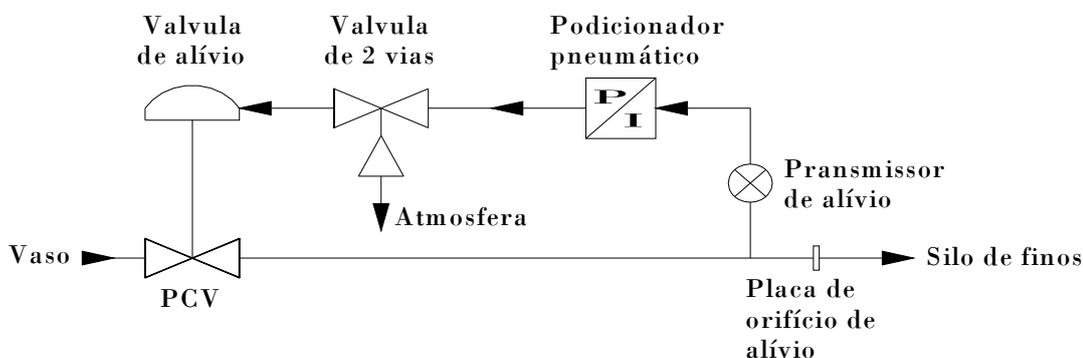


Figura 4.1 - Válvula direcional de duas vias implantada

4.4.2 Fase de alívio dos vasos

As ações tomadas na fase de alívio dos vasos para o aumento da capacidade nominal de injeção não podem incluir uma redução no tempo de alívio. Um tempo de alívio rápido pode levar a um desgaste prematuro da borracha de vedação da válvula, o que causaria uma elevada variação na vazão de carvão e até como consequência uma parada de injeção para efetuar a troca da borracha.

Para evitar estas paradas desnecessárias foram adotadas as seguintes premissas:

- Monitoração do tempo gasto para alívio total da pressão interna do vaso;
- Inclusão de algoritmo para eliminar a oscilação da pressão de alívio;
- Quanto maior o tempo de alívio menor o desgaste da válvula, porém reduz a capacidade nominal da taxa de injeção;
- Manter o tempo de alívio constante na faixa tolerável de 150 a 200 s.

A principal ação para se manter o tempo de alívio numa faixa constante foi a substituição do posicionador eletropneumático por um posicionador inteligente e auto ajustável, cuja principal função é proporcionar em tempo de alívio constante com uma despressurização linear do vaso de injeção sem oscilações. As oscilações de pressão do controlador de alívio levam a um desgaste prematuro da sede de borracha da válvula levando a variações de injeção. Porém, esta ação não foi eficiente devido ao posicionador eletromecânico ser mais robusto ao ambiente do que o posicionador eletropneumático.

4.4.3 Fase de pressurização

As ações tomadas na fase de pressurização dos vasos visando o aumento da capacidade nominal foram estabilizar a pressão dos tanques de armazenagem de nitrogênio medir e monitorar o intervalo de tempo da fase de pressurização do vaso.

Foi tentado também aumentar do diâmetro interno da placa de orifício de pressurização. Quanto maior o diâmetro do orifício, menor será o tempo necessário de pressurização. Porém isto causa uma maior instabilidade da pressão da rede de N₂ dos tanques de armazenagem e por consequência, aumento na variabilidade da vazão de carvão, o que acima de tudo é indesejável. Por este motivo, o aumento do diâmetro do orifício da placa foi descartado.

4.4.4 Fase de injeção

As ações tomadas na fase de injeção dos vasos para aumento da capacidade nominal da vazão de carvão pulverizado na linha principal foram:

- Peso máximo aumentado de 11 para 13 t;
- Peso mínimo reduzido de 2 para 1,5 t;
- Implantação da lança dupla de carvão.

Para controle e estimativa da capacidade nominal da fase de injeção foram implantadas as seguintes ações complementares:

- Cálculo da capacidade máxima de injeção em tempo real como variável resultante no SDCC tendo como referência a Expressão (4.2)
- Estimativa do tempo previsto para o término da fase de injeção tomando por base a Expressão (4.5);
- Medição dos tempos gastos em todas as fases e algumas de suas etapas e através de temporizadores acionados por programas especiais e telas gráficas no SDCC.

4.5 RESULTADOS DA EXPANSÃO DA CAPACIDADE DE VAZÃO

Durante a implementação das ações para atender a expansão e melhorias do processo, verificou-se inicialmente os seguintes resultados inconvenientes:

- a - Parada de injeção devido ao entupimento da peneira quando do aumento do diâmetro da placa de carregamento de 117 para 140 mm.
- b - Pequenas quedas de injeção por número mínimo de lanças, devido atuação indevida dos detectores de fluxo de carvão ("Granuflow"), quando o vaso de injeção possuía um peso menor que 2 t;
- c - Pressurização das peneiras com conseqüente vazamento para a área devido ao aumento da pressão de fluidização dos silos de carvão pulverizado (de 0,6 para 1,0 bar);
- d - Peneira parando cheia de carvão, o que provoca uma queda de injeção no ciclo seguinte por falta de matéria-prima (vaso não carregou).

Após a obtenção dos resultados inconvenientes relacionados anteriormente, as seguintes ações foram tomadas:

- a - Fechamento parcial das válvulas de manutenção na saída do silos de finos para reduzir a sobrecarga das peneiras;
- b - Redução da placa de orifício do carregamento de 140 para 125 mm e posteriormente para 110 mm (que permanece atualmente);
- c - Elevação do peso mínimo do carregamento de carvão dos vasos de 1,5 para 2 t;
- d - Redução do peso máximo do carregamento de carvão dos vasos de 13 para 12 t;
- e - Normalização da pressão de fluidização do silo de finos de 1 para 0,65 bar (também foi tentada manter a pressão em 0,5 bar o que causou queda de injeção por tempo elevado de carregamento);
- f - Implantação do sistema de referência (“set-point”) progressivo para novo controle de pressão de fluidização de acordo com o número de vasos carregando ao mesmo tempo:
 - f.1 - Um vaso sendo carregado: ajuste em 0,60 bar;
 - f.2 - Dois vasos sendo carregados: ajuste em 0,65 bar;
 - f.3 - Três vasos sendo carregados: ajuste em 0,70 bar;
 - f.4 - Quatro vasos sendo carregados: ajuste em 0,75 bar.

Os resultados obtidos referente aos ganhos para cada fase de injeção após os desenvolvimentos objeto desta tese estão mostrados na Tabela 4.2:

Tabela 4.2 - Tempos típicos das fases da injeção antes e após a expansão				
Fases	Definição	Tempo em s		
		Original	Expandido	Ganho
Alívio	Tempo necessário para o vaso ser aliviado da pressão de injeção para a pressão atmosférica	200	200	0
Carregamento	Tempo gasto para encher o vaso de carvão ate seu peso máximo	420	240	180
Pressurização	Tempo necessário para o vaso ser pressurizado ate a pressão de injeção	180	140	40
Injeção	Tempo que o vaso leva para esvaziar seu conteúdo para uma taxa de injeção de 30 t por hora	1100	1350	250
Total do ganho de tempo para o aumento da capacidade de vazão em s:				470

Assim, com o ganho de 470 s a capacidade de injeção foi expandida de 40 para 50 t/h em média, conforme ilustrado e calculado na última coluna.

4.6 REDUÇÃO DAS QUEDAS DE INJEÇÃO

Existem diversas causas de paradas de injeção geralmente relacionadas a equipamentos tais como: pressão baixa de instrumentação (< 5 bar), pressão baixa de alimentação dos compressores (< 12 bar), entre outras.

Os trabalhos [43] e [44] tratam destes assuntos sob o ponto de vista de ajustes finos, incorporação de equipamentos de maior qualidade e solução para defeitos do dia-a-dia da rotina de manutenção.

A seguir têm-se as quedas de injeção causadas por intertravamento da seqüência operacional de processo que foram melhoradas. Outras melhorias foram adicionadas na lógica de controle do PCI e são os resultados deste trabalho de tese.

4.6.1 Queda por número mínimo de lanças

A queda por número mínimo de lanças é um intertravamento original do sistema e tem por objetivo evitar a perda da capacidade nominal de Injeção. Esta capacidade nominal máxima é alcançada quando somente quando existem no mínimo 2/3 das lanças em operação. Se esta quantidade de lanças for reduzida ocorrerá a redução da capacidade de injeção e também não haverá distribuição uniforme de carvão nas ventaneiras do alto-forno.

As causas fundamentais para se retirar uma lança de operação são:

- a - Transmissor de vazão de sopro do tubo reto sem sinal ($I < 3,9$ mA);
- b - Detector de carvão em falha (nível lógico ϕ);
- c - Lança empenada ou entupida, o que impede a injeção;
- d - Válvulas de carvão ou nitrogênio de purga em falha (limites de fim-de-curso);
- e - Falha de fluxo de carvão na linha principal;
- f - Ventaneira isolada ou obstruída.

As primeiras causas são normais e dependem de uma boa manutenção e operação do sistema. Porém, a falha de fluxo de carvão aciona o detector de fluxo de carvão indevidamente, pois não há entupimento e isso faz com que a linha entre em purga. Isto diminui o número de lanças injetando, até que atinja o limite inferior causando a parada de injeção por segurança. A falha de fluxo de carvão ocorre principalmente quando há vazamento nas válvulas prato e alívio do vaso de injeção.

Para solucionar tal problema foi implantada na lógica de purga automática das lanças uma proteção que examina se número de lanças injetando é maior que o número mínimo de lanças mais quatro (+ 4). Portanto, o sistema verifica se ainda existe lança disponível para ser colocada em purga automática, evitando que a falha de fluxo de carvão acarrete uma parada de injeção por número mínimo de lanças.

A entrada de um grande volume de nitrogênio no vaso para reposição da pressão reduz a densidade de fluxo de carvão na linha que por sua vez atua os detectores de fluxo de carvão (“Granuflows”), colocando as lanças para purga. A queda de injeção ocorria por número mínimo de lanças.

As condições para a ocorrência do fenômeno são:

- Pressão do Vaso na faixa Alta ($PV > 12$ bar);
- Entrada da Válvula de Pressurização Rápida;
- Controladora de pressão do vaso toda aberta ($MV \geq 90\%$);
- Válvula Dosadora toda aberta ($ZI \geq 100\%$).

Quando ocorre a entrada de muito nitrogênio no vaso, a taxa de decréscimo do peso do vaso diminui levando a uma menor vazão de carvão. Em conseqüência, a válvula dosadora abre 100% para compensar o que agrava mais ainda a perda de pressão do vaso levando os “Granuflows” a atuar, reduzindo o número de lanças injetando abaixo do mínimo (condição de para de Injeção 2/3 da lança), sendo para o AF2 2/3 de 24, 16, ou seja, se somente 15 lanças estiverem injetando, ocorrerá a parada de injeção. Esta causa só foi eliminada pelo novo sistema de medição de vazão de carvão implantado na linha principal do transporte pneumático.

4.6.2 Vazão baixa de sopro do alto-forno

Numa situação normal de sopro e funcionamento do alto-forno, não há paradas de injeção devido a vazão baixa de sopro, a não ser que haja uma queda brusca de energia elétrica ou queda do motosoprador ou ainda uma redução operacional. Neste último caso, geralmente, trata-se de uma parada operacional e não de problemas com equipamentos. Poderia sim haver a chance de que a malha de controle do sinal de vazão de sopro sofra um dano e haja então uma parada de injeção devido a rompimento do cabo de sinal de sopro, ou algo semelhante.

Um problema de alto risco a segurança do alto-forno, era o fato de que na queda brusca da vazão de sopro, alguns algaravizes enchiam de carvão o que poderia ocasionar uma grande explosão na sala de corridas. Isto ocorria devido ao tempo de limpeza da linha e ao fato de algumas vazões de tubos retos que são usadas como intertravamento de injeção permaneciam com sinal de sopro, devido a passagem preferencial de fluxo na redução do sopro.

Para solucionar tal problema, foi implantado o fechamento instantâneo de todas as válvulas de carvão na saída do distribuidor em caso de queda rápida da vazão de ar soprado. Isto penalizou a limpeza da rota de carvão, porém garantiu a segurança operacional dos algaravizes do alto-forno. Em caso de redução lenta do sopro foi preservada a parada de injeção normal com limpeza da rota de carvão, conforme Tabela 4.3, a frente.

4.6.3 Vazão baixa de nitrogênio de transporte

A falta do nitrogênio de transporte é muito perigosa pois a ausência de refrigeração da lança causa o rompimento do tubo metálico flexível de injeção na sala de corridas devido ao ar quente soprado em fluxo reverso. Este desenvolvimento da tese previne a queima destes tubos flexíveis de injeção das lanças de carvão, o acúmulo de carvão no conjunto porta-vento e o caos provocado pelo espalhamento de carvão pulverizado (altamente inflamável) na sala de corridas do alto-forno. Esta foi uma proteção adicional ao projeto original pela tese para gerar uma parada de injeção.

Os principais possíveis motivos para este tipo de queda de injeção são:

- a - Válvula manual fechada em campo:** Esta é a causa mais comum e a responsável pela implementação desta proteção, pois caso haja uma interrupção brusca no fluxo de nitrogênio de transporte, há risco de queima e estouro das mangueiras de injeção localizadas nas salas de corridas. Para evitar este problema, as válvulas de carvão são então fechadas imediatamente sem proporcionar a limpeza adequada da rota de carvão, abrindo as válvulas de nitrogênio de purga e refrigerando as mangueiras.
- b - Transmissor ou malha de controle de vazão de N₂ de arraste danificada:** Foi implementada como segurança uma parada de injeção caso haja uma falha no transmissor de vazão de N₂ de arraste, uma falha no cartão de entrada analógica, na válvula de controle de vazão, ou enfim, em qualquer ponto da malha de controle e intertravamento. Isto provocará a mesma ação que consiste no fechamento de todas as válvulas de carvão e abertura imediata das válvulas de N₂ de purga do distribuidor.

A Tabela 4.3 resume os dois tipos de ações tomadas pelo SDCD em caso de queda súbita de vazão de sopro e queda súbita da vazão de nitrogênio de arraste ou transporte para os Altos-fornos 2 e 3 da CSN.

Tipo da parada de injeção	Ação	Vazão de ar soprado mínima AF2 em m ³ /min na CNTP	Vazão de ar soprado mínima AF3 em m ³ /min na CNTP	Vazão de nitrogênio de transporte mínima em m ³ /h na CNTP
Normal	Fecha a válvula dosadora, abre a válvula de nitrogênio de arraste e efetua a limpeza da linha de transporte pneumático	1600	4000	200
Rápida	Fecha todas as válvulas de carvão do distribuidor e abre as válvulas de nitrogênio de purga sem efetuar a limpeza da linha de transporte pneumático	1000	3000	100

A Figura 4.2 ilustra a parte da tela gráfica com os valores atuais de vazão de ar soprado e vazão de nitrogênio de transporte em branco bem como os valores de intertravamento para uma parada normal e parada rápida da estação de injeção em vermelho.

PARADA DE INJEÇÃO	FI6006.PV	2827 Nm ³ /min	FYC3182.PV	1309 Nm ³ /h
NORMAL	FI6006.PL	1000 Nm ³ /min	FYC3182.PL	200 Nm ³ /h
RÁPIDA	FI6006.LL	1000 Nm ³ /min	FYC3182.LL	100 Nm ³ /h

Figura 4.2 - Valores de intertravamentos desenvolvidos

O original do sistema era somente a parada de injeção normal. A tese implementou a parada de injeção rápida e sua ação de fechamento rápido das válvulas de carvão do distribuidor sem efetuar-se o período de limpeza da linha principal com N₂ previsto originalmente por [4] devido ao risco de entupimento da linha principal, o que nunca ocorreu.

4.6.4 Queda de injeção por pressão diferencial baixa

Foi implementada pelos trabalhos desta tese, a parada de injeção por pressão diferencial menor que 0,2 bar entre a pressão do fluxo bifásico na curva de 90° antes do distribuidor e a pressão da base do sopro do alto-forno, tal como ilustra a Expressão (4.7) a seguir:

$$\Delta P = (P_T - P_{AF}) \geq 0,2 \text{ bar} \quad (4.7)$$

Por exemplo, caso a pressão de injeção ou pressão do vaso esteja em 10 bar, a pressão da linha de transporte em 4,7 bar e a pressão do ar soprado na base do forno (anel de vento) em 4,2 bar, a pressão diferencial será:

$$\Delta P = 4,7 \text{ bar} - 4,2 \text{ bar} = 0,5 \text{ bar} \geq 0,2 \text{ bar}.$$

Ocorrerá parada de injeção se a pressão diferencial entre o PCI e o forno estiver abaixo de **0,2 bar durante 60 s**. Isto foi uma segurança implementada para evitar o retorno do sopro do forno para o vaso de injeção ou ainda estouro das mangueiras de injeção, uma vez que quando ocorre uma queda de injeção o nitrogênio de transporte é colocado no máximo e a refrigeração do tubo flexível de injeção será garantida.

Este intertravamento foi aperfeiçoado com a inclusão da medição de pressão na curva de 90° antes do distribuidor. Com a implementação do transmissor de pressão manométrico na curva de 90° antes do distribuidor, este intertravamento de segurança implementado foi aprimorado visto que esta pressão está mais próxima do alto-forno, proporcionando um intertravamento mais correto.

4.6.5 Alarmes antecipatórios de queda de injeção

Foram elaborados alarmes que antecipam com alerta uma possível queda de injeção no futuro. Eles se baseiam na supervisão dos tempos das fases de injeção, carregamento, alívio e pressurização desenvolvidos neste capítulo. Além disto, existe também a monitoração dos tempos de operação dos equipamentos:

- a - Tempo longo de alívio ou carregamento;
- b - Válvula prato ou dosadora não fecharam;
- c - Peneira para partiu/parou;
- d - Possível queda de injeção devido a vaso não preparado.

4.7 ALGORITMO DE CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO

O algoritmo de carregamento dos vasos foi criado para mitigar o problema de obstrução da placa de orifício de carregamento dos vasos ou ainda para os problemas de entupimento dos bicos fluidizadores da base do silo de finos. A ação definitiva para este problema é a limpeza da placa de orifício do carregamento. Porém, isto só pode ser feita na parada do processo, o que ocorre somente a cada 9 meses.

A seguir tem-se a descrição do algoritmo de carregamento dos vasos de injeção implementado. Sejam:

T_e : Tempo expandido de 10 em 10 s;

T_c : Tempo máximo permitido para o carregamento;

T_a : Tempo de carregamento.

O tempo acumulado de carregamento, T_a , é um temporizador que é iniciado assim que a válvula prato é aberta para iniciar abastecer o vaso. Seus valores típicos estão em torno de 300 s. Conforme requerido pelo projeto com PCR de 200 kg/t. Porém, este tempo de projeto só foi conseguido após desenvolvimentos realizados na expansão da capacidade de injeção do PCI relatados no artigo [19].

É tolerado que o tempo de carregamento seja de até 400 s. Tempos maiores que este poderão indicar os seguintes defeitos:

- a - Entupimento parcial da tubulação de carregamento;
- b - Obstrução da placa de orifício limitadora da vazão de carvão;
- c - Corpos estranhos na peneira ou semi-obstruída com resíduos;
- d - Pressão baixa de fluidização do silo de finos;
- e - Bicos fluidizadores do silo de finos entupidos;
- f - Falha nas válvulas redutoras de pressão de fluidização do silo de fluidização, etc.

Todas estas causas fundamentais listadas anteriormente podem provocar uma queda de injeção devido a vaso não preparado causando uma enorme variação de injeção a curto e longo prazo.

O algoritmo de carregamento permite uma expansão cadenciada do tempo de carregamento preliminar para mitigar a vazão baixa de carvão provocada pelo entupimento parcial da linha de abastecimento do silo de finos para os vasos.

O tempo máximo permitido para o carregamento, T_c , era pela descrição funcional do fabricante um valor constante de 5 minutos. Este valor é calculado levando-se em consideração a máxima taxa nominal original de injeção de 40 t/h. Em muitos casos, onde havia ainda tempo disponível para abastecer o vaso, o carregamento era interrompido ficando sem carvão suficientemente para uma nova fase de injeção. Isto gerava uma queda de injeção por vaso não preparado, sendo um problema difícil diagnóstico, uma vez que a queda de injeção por vaso não preparado só ocorre no ciclo seguinte.

Para aprimorar esta versão original, inicialmente foi criada uma curva para o ajuste de T_c em função da taxa de injeção, conforme ilustra o Figura 4.3. Os valores da curva foram calculados para que nunca haja interrupção no fluxo de carvão, tal como descrito no artigo [1].

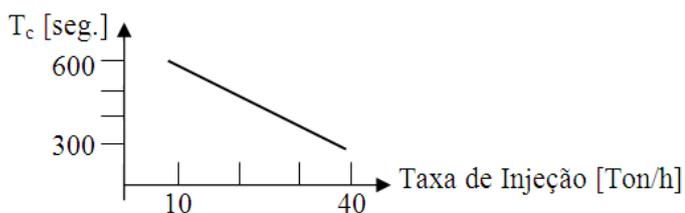


Figura 4.3 - Tempo de carregamento em função da taxa de injeção

A curva é calculada sabendo-se o tempo de preparo do vaso oposto com grande margem de segurança de 5%. Este tempo de carregamento é expandido em passos de 10 em 10 s, por exemplo, até que o tempo remanescente para carregamento mais pressurização e operação de válvulas e peneiras, seja 5% maior que o tempo previsto para o fim da fase de injeção do vaso oposto.

As Equações 4.8 a 4.10 a seguir são também utilizadas na determinação de subfases de espera despressurizada e pré-pressurização dos vasos, tal como descrito em [32]. Elas exemplificam o funcionamento do algoritmo de carregamento dos vasos de injeção de carvão pulverizado:

$$T_e = T_c \text{ quando o vaso inicia o carregamento;} \quad (4.8)$$

$$T_e = T_e + 10 \text{ se;} \quad (4.9)$$

$$(T_v + T_{op} + T_{prato} + T_p) > 1,1 \times T_{FIM} \quad (4.10)$$

Onde,

T_e : Tempo expandindo para possibilitar carregamento em mais 10 s.

T_v : Tempo para esvaziar a peneira. Normalmente é fixo em 60 s. Se ajustado, o programa do algoritmo do carregamento leva o ajuste em consideração;

T_{prato} : Tempo para fechar a válvula prato após desligar peneira. É fixado em 8 s;

T_{op} : Tempo de operação das válvulas, estimado em 10 s;

T_p : Tempo estimado para pressurizar o vaso em s. Calculado a todo instante conforme a Equação 4.11 a seguir:

$$T_p = (P_i \times P_{tanque}) \times 15/17 \quad (4.11)$$

Onde:

P_i : Pressão final de injeção do vaso (“set-point” de pressão do vaso);

P_{tanque} : Pressão dos tanques de Nitrogênio (“set-point” em 17 bar).

O tempo previsto para o término da injeção em segundos é calculado a todo instante e apresentado em tempo real na Figura 4.6 a frente. Ele é calculado tal como ilustra a Equação 4.12 a seguir:

$$T_{fim} = (P_{atual} - P_{mín}) / (T_x) \text{ s} \quad (4.12)$$

Onde:

T_{fim} : Tempo previsto para o término da injeção em s;

T_x : Vazão de carvão pulverizado em t/h;

P_{atual} : Peso atual do vaso de injeção em t;

$P_{mín}$: Peso mínimo, normalmente ajustado em 2,0 t.

Assim o algoritmo de carregamento irá expandir o tempo máximo de carregamento. A premissa é: encha o vaso com o máximo de peso possível enquanto houver tempo disponível. Portanto a fase de carregamento é a fase priorizada dentre as demais (alívio, pressurização e injeção).

Na fase de carregamento, o vaso é abastecido com carvão elevando seu peso de menos de 1 t para mais de 12,5 t para ser injetado no próximo ciclo. O tempo de carregamento do vaso, " T_c ", é o tempo gasto para se abastecer o vaso desde seu peso vazio, cerca de 1,5 t, seu peso cheio, cerca de até 12,5 t.

O intervalo de tempo " T_c " é medido por um temporizador que parte quando a seqüência da fase de carregamento é iniciada, ou seja, assim que a válvula prato de admissão do vaso é aberta para o carregamento.

Os tempos típicos de carregamento estão em torno de 300 s conforme requerido pelo projeto com PCR de 200 kg/t, porém só foi conseguido após desenvolvimentos realizados na expansão da capacidade de injeção do PCI [2]. É tolerado que este tempo seja de até 400 s, sendo que tempos maiores poderão indicar um entupimento parcial da tubulação de carregamento, obstrução da placa de orifício limitadora da vazão de carvão, corpos estranhos na peneira, baixa pressão de fluidização do silo de finos, bicos fluidizadores do silo de finos entupidos, falha nas válvulas de fluidização, etc.

Os tempos e o funcionamento em tempo real do algoritmo de carregamento dos vasos de injeção com os tempos calculados de T_c e tempo expandido T_e podem ser vistos no algoritmo da Figura 4.4, que ilustra a estratégia adotada para o carregamento dos vasos de injeção:

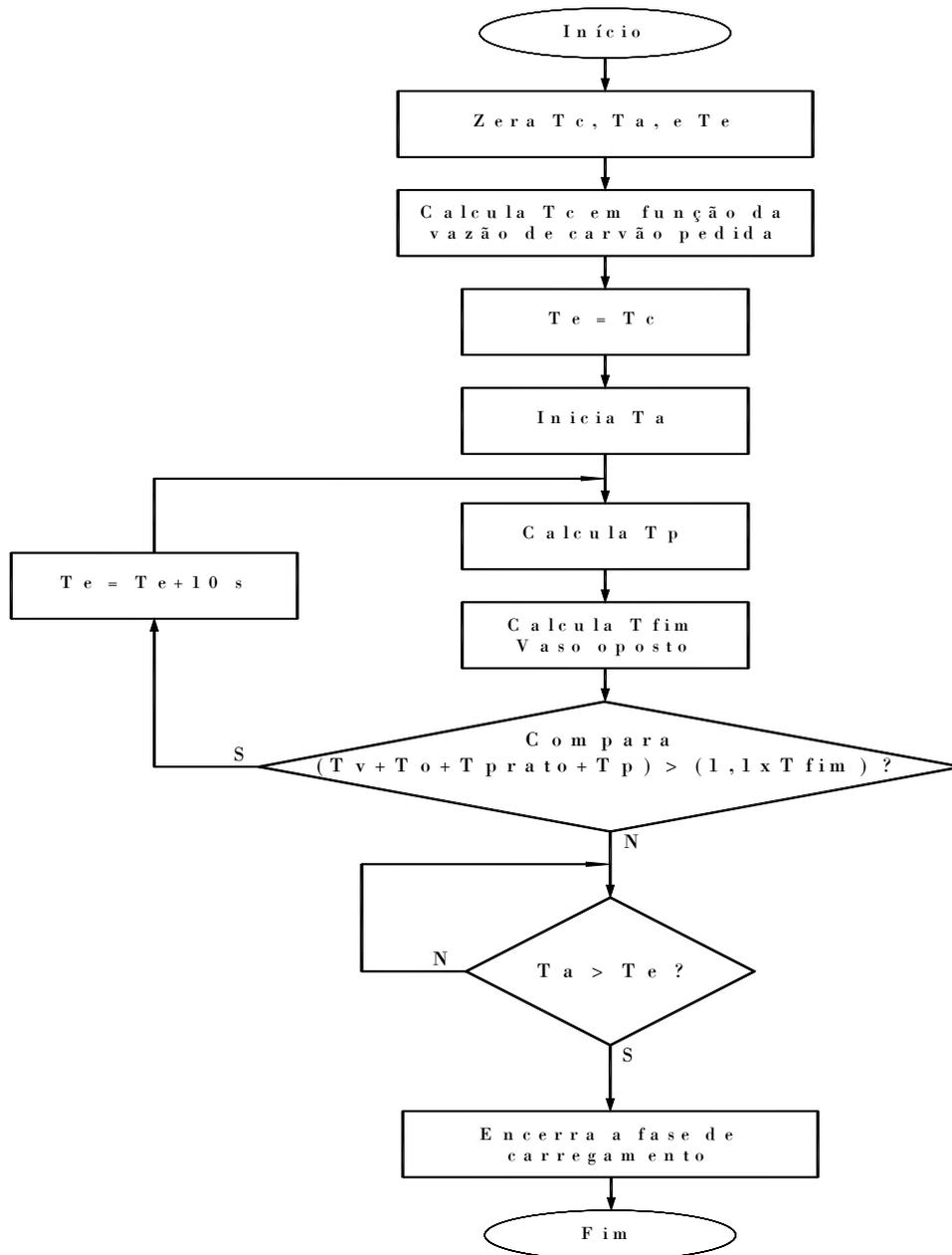


Figura 4.4 - Algoritmo de carregamento dos vasos de injeção do AF3

4.8 SINCRONISMO DO CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO

O sincronismo do carregamento dos vasos de injeção foi realizado somente nos quatro vasos do AF3. Ele visa eliminar o elevado tempo de carregamento quando há coincidência de dois vasos sendo carregados no mesmo instante. Quando acontecia o carregamento simultâneo de dois vasos de injeção do AF3 que são abastecidos pelo mesmo silo de finos, o tempo de carregamento “Tc” aumentava decorrente de um fenômeno que minimizava a vazão de carvão para o carregamento.

O sincronismo ocorre pela ação complementar ao peso máximo do vaso durante seu carregamento. Se ocorrer de dois vasos carregarem ao mesmo tempo, o primeiro vaso que tiver o peso acima de 10 t encerrará o carregamento em prol do outro vaso cuja fase de carregamento acabou de iniciar. Existem doze combinações possíveis de vasos e máximos pesos, todos contemplados na lógica.

Esta antecipação do fim do carregamento provoca um defasamento de tempo entre os vasos ajustando para que as fases de carregamento não mais coincidam. Isto eliminou diversas quedas de injeção, ou seja, descontinuidades na vazão de carvão para o AF3 no ano de 2008.

Uma das principais causas de quedas de injeção ocorria quando o carregamento simultâneo dos vasos de injeção os seus tempos de carregamento aumentavam substancialmente e geravam quedas de injeção por vaso não preparado. A sua observação era difícil, pois o carregamento simultâneo de dois vasos pelo silo de carvão pulverizado ocorria a cada seis ou oito horas e, além disto, seu efeito ocorria somente em alguns ciclos no futuro. Porém, a associação e correlação da queda de injeção com o carregamento simultâneo eram sempre verdadeiras.

Os principais objetivos do sincronismo do carregamento dos vasos são:

- Evitar que dois vasos de injeção carreguem ao mesmo tempo aumentando o tempo de carregamento individual e não comprometendo a capacidade normal de injeção de 50 t/h conforme ações do trabalho descrito em [19];
- Criar uma defasagem entre as fases do vaso, evitando que dois vasos aliviem ao mesmo tempo. Isto provê uma inertização de forma mais contínua no silo de finos;

- Evitar que dois vasos pressurizem ao mesmo tempo e haja uma queda de pressão de nitrogênio nos tanques gerando distúrbios na rede de nitrogênio e desregulando as vazões do transporte pneumático de carvão.

Descrição da lógica implementada: Quando ocorrerem dois vasos carregando ao mesmo tempo, o primeiro deles que tiver seu peso acima de 10 t, calculado de acordo com as fórmulas anteriores para a máxima taxa de injeção de 50 t/h, terá seu carregamento cancelado antes de atingir o peso máximo em prol do outro vaso que ainda está carregando.

O silo de carvão pulverizado finos do AF3 abastece as duas estações de injeção que apesar de terem a mesma taxa possuirão certamente diferentes tempos naturais, realizando então a defasagem dos vasos de injeção.

Isto criou também uma defasagem artificial para as fases dos vasos de injeção, compensando a defasagem natural que ocorre com o passar de seis a oito horas, resultado da diferença ínfima de operação de suas válvulas, tempos das fases de alívio, etc.

Esta defasagem garante maior estabilidade para a rede de nitrogênio de alta pressão, pois após o sincronismo não ocorrerá a pressurização de dois vasos de injeção do AF3 ao mesmo tempo.

4.9 RETOMADA AUTOMÁTICA DA INJEÇÃO APÓS UMA QUEDA

Visto que não se podem desprezar os intertravamentos de segurança que levam a uma queda de injeção, eliminá-las na prática é impossível. Vale aqui então, a estratégia da recuperação rápida da vazão de carvão pulverizado na linha principal que diminui o tempo de duração da queda de injeção ida em alguns minutos.

Quando ocorria uma queda de injeção, o controlador de vazão do transporte pneumático abria a válvula totalmente e era mantido em manual. Para voltar com a injeção, após a normalização da queda, o operador colocava a válvula manualmente numa posição intermediária, e aí então colocava o controlador de vazão de transporte em automático. O controlador e válvula levavam algum tempo para se normalizarem devido a dinâmica lenta de seu controlador PID e por conseqüente a vazão de arraste do transporte pneumático. Isto trazia uma demora de até 3 minutos para normalizar a vazão de carvão desejada. Além disto, o excesso de vazão de nitrogênio de transporte impede a descida de carvão do vaso, isto é, interfere na fluxabilidade da mistura bifásica advinda do vaso.

A retomada automática rápida para a vazão de nitrogênio de transporte foi desenvolvida para copiar o processo descrito acima com a vantagem de possuir uma curva pré-determinada para a posição final da válvula de acordo com a taxa de injeção pedida. Esta curva permitiu que a válvula de transporte fosse colocada numa posição conhecida e o controlador em automático logo após. Isto reduziu o tempo de retomada de 3 para 1 minuto sem precisar de intervenções manuais.

A válvula de controle da vazão de fluidização por sua vez ficava totalmente aberta. Isto ocorria porque seu controlador era mantido pela lógica em automático e após queda de injeção, as válvulas de fechamento atuavam zerando a vazão. Quando a injeção voltava, ocorria o excesso de fluidização, pois sua válvula de controle estava toda aberta ocasionando falha no fluxo de carvão devido ao excesso de nitrogênio, o que impedia a rapidez para a normalização do processo.

A melhoria da tese configurou a retomada automática rápida para a fluidização colocou a válvula de controle de vazão parada após uma queda de injeção. Isto foi feito colocando-se o controlador em manual enquanto durasse a queda de injeção. Assim a posição final de controle foi mantida preservada na memória do controlador de vazão de fluidização. Na retomada, o controlador é colocado modo automático de maneira autônoma pela lógica, eliminando o efeito descrito anteriormente e contribuindo para a rapidez na normalização da vazão de injeção, pois não há necessidade de intervenção do operador.

O algoritmo da Figura 4.5 ilustra a ação da válvula de controle de vazão de nitrogênio de transporte em caso de queda ou parada de injeção:

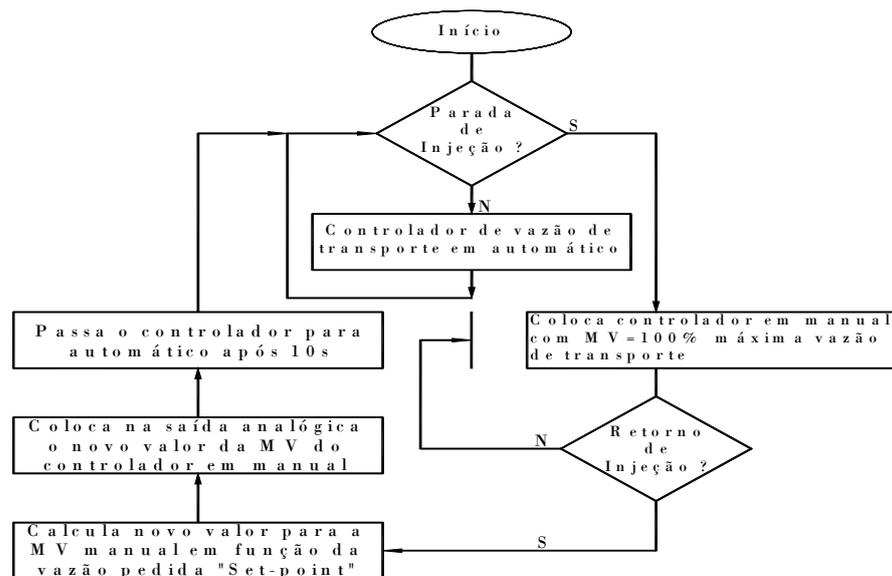


Figura 4.5 - Algoritmo de retomada rápida após queda da vazão de carvão

4.10 NOVA SEQUÊNCIA PARA A INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

O principal objetivo da nova seqüência é aumentar a vida útil das válvulas de alívio e prato que interferem fortemente com a variação da vazão de carvão em caso de vazamento conforme descrevem [40].

Para tal é necessária a modelagem e medição dos tempos das fases de injeção. Uma tela gráfica foi configurada no SDCD [13] para monitorar os ciclos das injeções exibindo em tempo real os períodos gastos por cada fase do ciclo dos vasos, conforme ilustra a Figura 4.6. A matriz é composta de parâmetros e medidas nas colunas, e os 6 vasos de injeção do PCI nas linhas, mostrando o tempo gasto por fase bem como os valores instantâneos de suas variáveis de processo tais como pressão de injeção e vazão de carvão em t/h.

PARAM.		TEMPO DE CARREGAM.	TEMPO FSV. PENEIRA	TEMPO FECH. PRATO	TEMPO FECH. ALÍVIO	TEMPO TOTAL CARREG.	PARAMETROS DO ALÍVIO	PESOS	TEMPO ESPERA DESPRES.	TEMPO DE PRES.	TEMPO ESPERA PRES.	TEMPO DE INJEÇÃO	PREVISTO TERMINO INJEÇÃO	CAPAC. MÁXIMA INJEÇÃO
EQUIPAM.		[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[t]	[s]	[s]	[s]	[s]	[s]	[t/h]
VAZÃO CARVÃO 22,58 t/h VASO 1 AF 03	EXPANDIDO	576					SV 400 mbar PV 6 mbar P = 400 l = 30 D = 0	MAX. 12,20 ATUAL 2,90 MIN. 2,00		274				
	INICIAL	576	60	12	4	99			775	149	152	1773	144	38,07
	PV	66					TEMPO 142			0,0 bar				
CARREGANDO VASO 2 AF 02	EXPANDIDO	546					SV 400 mbar PV 27 mbar P = 400 l = 20 D = 0	MAX. 11,20 ATUAL 10,70 MIN. 2,00		274				
	INICIAL	546	60	12	5	453			818	158	159	278	1388	47,62
	PV	334					TEMPO 119			10,9 bar				
VAZÃO CARVÃO 18,12 t/h VASO 1 AF 03	EXPANDIDO	625					SV 600 mbar PV 6 mbar P = 400 l = 25 D = 0	MAX. 13,00 ATUAL 12,75 MIN. 2,00		155				
	INICIAL	625	45	12	1	358			1162	84	71	2539	2136	38,04
	PV	265					TEMPO 167			0,0 bar				
PREPARADO VASO 2 AF 03	EXPANDIDO	677					SV 600 mbar PV 37 mbar P = 400 l = 30 D = 0	MAX. 13,00 ATUAL 5,15 MIN. 2,00		140				
	INICIAL	677	45	12	2	360			1833	122	19	1743	626	30,34
	PV	261					TEMPO 131			10,0 bar				
VAZÃO CARVÃO 15,50 t/h VASO 3 AF 03	EXPANDIDO	693					SV 600 mbar PV -10 mbar P = 600 l = 50 D = 0	MAX. 13,00 ATUAL 12,99 MIN. 2,00		140				
	INICIAL	693	45	12	5	542			498	85	70	2546	2554	44,01
	PV	283					TEMPO 175			0,0 bar				
PREPARADO VASO 4 AF 03	EXPANDIDO	699					SV 400 mbar PV 39 mbar P = 250 l = 30 D = 0	MAX. 11,20 ATUAL 6,88 MIN. 2,00		150				
	INICIAL	699	60	12	6	364			1790	99	57	1288	1134	38,03
	PV	252					TEMPO 139			9,4 bar				

Figura 4.6 - Monitoração das fases dos ciclos de injeção dos vasos

O cálculo dos tempos tem por finalidade de interligar a lógica dos vasos e sincronizá-los. Outra utilidade é a monitoração do bom funcionamento dos equipamentos e malhas de controle. Pode-se destacar o tempo de espera despressurizada, de alívio, de espera pressurizada, de pressurização, de injeção e finalmente o tempo previsto para o fim da injeção.

Para entendimento da nova seqüência dos vasos de injeção é necessário conhecer a nomenclatura da Tabela 4.4 a seguir:

Símbolo	Descrição	Valor típico
P _{máx}	Máxima pressão de operação do vaso	13 bar
P _{mín}	Mínima pressão de operação do vaso	9 bar
C _{máx}	Máxima vazão de carvão pulverizado	50 t/h
C _{mín}	Mínima vazão de carvão pulverizado	10 t/h
C _{REQU}	Vazão pedida pelo alto-forno	30 t/h
T _A	Intervalo de tempo de alívio do vaso de injeção	150 a 180 s
T _P	Intervalo de tempo para pressurizar o vaso de injeção	150 a 170 s
T _{fim}	Tempo previsto para o término da fase de injeção	1200 s
T _i	Intervalo de tempo decorrido da atual fase de injeção	690 s
P _V	Pressão de injeção do vaso em função de C _{REQU}	11 bar
P _T	Pressão dos tanques de armazenagem de alta	17 bar
P _{FOX}	Pressão da rede de nitrogênio de baixa direta da FOX	3 a 4 bar
P _a	Pressão atual do vaso de injeção	108 bar
W _a	Peso atual do vaso de injeção	7 t
W _{máx}	Peso máximo de carregamento do vaso	12 t
W _{mín}	Peso mínimo para troca do vaso	2 t

a - Tempo de espera despressurizada

A filosofia de funcionamento da espera despressurizada foi concebida para criar uma fase onde seria permitida a reutilização do nitrogênio de alívio dos vasos de injeção. Ela é descrita a seguir:

“Quando o tempo previsto para o término da injeção do vaso oposto for menor que 1,1 vezes o tempo previsto para a pressurização do vaso, a fase de espera despressurizada é finalizada, iniciando-se a fase de pressurização final”

A Inequação (4.13) ilustra este intertravamento:

$$T_{FIM} < 1,1 \times T_P \quad (4.13)$$

A abertura da válvula de pressurização rápida que antes ocorria logo após o fim da fase de carregamento, agora abre 165 s ($1,1 T_p$) antes do início de sua própria injeção.

O tempo de espera despressurizada é iniciado assim que o vaso termina a fase de carregamento. Durante este tempo o vaso está apto a receber pressão ou permanecer despressurizado até que o tempo previsto para o término da injeção do vaso oposto seja menor que o tempo necessário para o vaso pressurizar, mais um tempo de segurança de 10%, de acordo com a equação (4.13).

Durante este tempo, o vaso está em espera despressurizada ou pré-pressurização dependendo se a pré-pressurização dos vasos estiver implementada e em funcionamento. Mesmo com o sistema de pré-pressurização desligado, existe o ganho no desempenho da planta proporcionada pela espera despressurizada que aumenta o tempo de vida das válvulas prato e alívio. Com o sistema de pré-pressurização ligado, o vaso está pronto para receber N_2 da rede de baixa pressão.

Este tempo é parado quando o vaso abre a válvula de pressurização rápida para obter a pressão final de injeção, ou seja, quando o intertravamento da equação (6.1) é satisfeito. O tempo percentual em que o vaso permanece pressurizado diminui 29,2%, ou seja, de 85,6% para 56,4%.

b - Tempo de alívio

O Tempo de alívio é mostrado juntamente com os parâmetros PID, SP e PV do controlador de alívio. A válvula de alívio possui um atuador pneumático comandado por um posicionador pneumático integrante. Ela deve aliviar toda a pressão do vaso após a fase de injeção, permitindo uma nova fase de carregamento. O tempo foi previsto em projeto para aliviar 10 bar de um vaso de 25 m³ é de 150 a 180 s de maneira que o topo do silo de finos e seu filtro para atmosfera não sejam sobrepressurizados ($P < 25$ mbar). Seu controlador e transmissor de posição são inspecionados com frequência, o qual não pode oscilar durante o alívio, o que causaria um desgaste excessivo da válvula de alívio e uma sobrepressão no topo do silo de finos provocando a abertura da válvula de alívio no topo do silo de finos, inundando a área com pó de carvão.

O tempo de alívio é medido assim que a fase de alívio é iniciada e o controlador PID é comutado de manual para automático. O temporizador é parado assim que a pressão do vaso for menor que 0,2 bar durante 10 segundos, quando uma nova fase de carregamento é iniciada.

c - Tempo de espera pressurizada

Como o vaso se pressurizava logo após o carregamento, o tempo de espera pressurizada dependia essencialmente da taxa de injeção.

Para a maior taxa de injeção do projeto, este tempo de folga mínima prevista pelo projeto para não causar interrupção na injeção era de 2,1 min. Em taxas de injeção normais de 30 t/h, o vaso permanecia cerca de 15 min pressurizado desnecessariamente. Durante esta fase, se houvesse algum vazamento, ele seria aumentado gradualmente. Como visto, todo desenvolvimento efetuado para minimizar os vazamentos nas válvulas prato e alívio contribuiu para a estabilidade da vazão de carvão, diminuindo a variação de injeção, devido à estabilidade da pressão de injeção no interior do vaso.

d - Tempo de pressurização calculado e medido

O tempo de pressurização teórico pode ser estimado com precisão através da Equação (4.11) anterior.

Se por exemplo a taxa de injeção requerida pelo alto forno for de 30 t/h, o “Set-point” de pressão de injeção do vaso será de aproximadamente 10 bar, resultando num tempo típico de pressurização de 150 s. Toda vez que a fase de pressurização é iniciada este calculo é refeito.

Já o tempo de pressurização real é medido por um temporizador que parte quando a válvula de pressurização rápida é aberta e para quando fecha, ou seja, quando atinge a pressão final de injeção do vaso. Com o advento da pré-pressurização do vaso de nitrogênio, cerca de 1/3 do volume de pressurização é economizado. Assim o tempo de pressurização estimado pode ser novamente calculado a partir da Equação (4.5) chegando-se a Equação (4.14):

$$T_p = \left((P_I - P_{FOX}) \times P_{Tanque} \right) \times \frac{15}{17} \quad (4.14)$$

Onde:

P_I : Pressão final de injeção do vaso (“set-point” de pressão do vaso);

P_{tanque} : Pressão dos tanques de Nitrogênio (“set-point” em 17 bar);

P_{FOX} : Pressão inicial, ou pressão final de equalização da pré-pressurização dos vasos, que é a pressão da FOX (P_{FOX}).

e - Tempo de injeção decorrido e tempo previsto para o término da injeção

O temporizador para medir o intervalo de tempo decorrido desde o início da fase de injeção do vaso é iniciado quando a válvula dosadora abre para assumir a rota principal de injeção. No fim da fase de injeção o temporizador é parado e retém o tempo gasto na última fase de injeção.

O tempo previsto para o término da injeção é usado para definir o fim da espera despressurizada dos vasos de injeção, ou seja, para “autorizar” o término da preparação de injeção do vaso com o nitrogênio dos tanques através da válvula de pressurização rápida.

4.11 ESPERA DESPRESSURIZADA DOS VASOS DE INJEÇÃO

A Tabela 4.5 ilustra o ciclo de funcionamento das cinco fases da estação de injeção, incluindo a espera (projeto original + espera despressurizada implantada nesta tese).

Fase	Nome	Descrição	Tempo
1	Carregamento	O vaso despressurizado é cheio com carvão pulverizado até 12 t.	350 s
2	Espera Despressurizada	O vaso já carregado aguarda despressurizado até o tempo previsto para o termino da injeção do vaso oposto alcance o valor mínimo de segurança.	800 s
3	Pressurização	O vaso de injeção é pressurizado com nitrogênio de pressão alta (17 bar) até a pressão de injeção.	200 s
4	Injeção	O carvão pulverizado do vaso é injetado para o Alto-forno até atingir o peso mínimo de 2 t. para a troca com o vaso oposto.	1600 s
5	Alívio	O vaso de injeção é aliviado gradativamente até zerar sua pressão, para uma nova fase de carregamento.	250 s

A Tabela 4.6 ilustra o ciclo de funcionamento atual das fases de injeção, carregamento, espera despressurizada, pré-pressurização, pressurização rápida, injeção e alívio, após o desenvolvimento realizado pela tese.

Fase	Nome	Descrição	Tempo
1	Carregamento	O vaso despressurizado é cheio com carvão pulverizado até 12 t.	300 a 400 s
2	Espera Despressurizada	O vaso já carregado aguarda despressurizado até o tempo previsto para o termino da injeção do vaso oposto alcance o valor mínimo de segurança.	600 a 900 s
3	Pré-pressurização	O vaso é pressurizado com nitrogênio de pressão baixa de 3 a 4 bar alimentado pela Fox.	40 a 50 s
4	Pressurização Rápida	O vaso de injeção é pressurizado com nitrogênio de pressão alta (17 bar) até a pressão de injeção.	Puro 145 s
			Com pré-pressurização 110 a 150 s
5	Injeção	O carvão pulverizado do vaso é injetado para o Alto-forno até atingir o peso mínimo de 2 t. para a troca com o vaso oposto.	1600 s
6	Alívio	O vaso de injeção é aliviado gradativamente até zerar sua pressão, para uma nova fase de carregamento.	150 a 180 s

4.12 DESCRIÇÃO DA PRÉ-PRESSURIZAÇÃO DOS VASOS

O sistema de pré-pressurização destina-se a conservação de energia sobre a forma energia elétrica através do desvio do fluxo de nitrogênio dos compressores. A nova fase, espera despressurizada, criou condições para a pré-pressurização dos vasos de injeção permitindo a utilização do nitrogênio de baixa pressão para uma pré-pressurização de um vaso qualquer de uma das estações de injeção.

Assim, novamente, as fases dos vasos foram rescritas em sete fases distintas: carregamento, espera despressurizada, pré-pressurização, pressurização, espera pressurizada, injeção, e alívio. Para garantir a possibilidade de pré-pressurização com N₂ de baixa pressão pelo vaso, as fases foram redivididas para que a filosofia desta nova seqüência lógica de funcionamento fosse aplicada.

As novas fases dos ciclos de injeção são mostradas na Tabela 4.7 a seguir. Com o tempo típico gasto, pressão do vaso de injeção e com o comportamento da válvula de pré-pressurização nas novas fases dos vasos.

Fases	Descrição	Tempo em s	Pressão em bar	Pré-pressurização
1	Injeção	1600	12,0	Fechada
2	Alívio	150 a 180	12,0~ 0,0	Fechada
3	Carregamento	300 a 400	0,0	Fechada
4	Espera despressurizada	900	0,0	Fechada
5	Pré-pressurização	45	0,0 ~ 3,0	Aberta
6	Pressurização	70	3,0 ~ 12,0	Fechada
7	Espera pressurizada	20	12,0	Fechada

A Figura 4.7 ilustra o projeto da linha de pré-pressurização dos seis vasos de injeção com nitrogênio de pressão baixa vindo diretamente da FOX sem passar pela estação dos compressores.

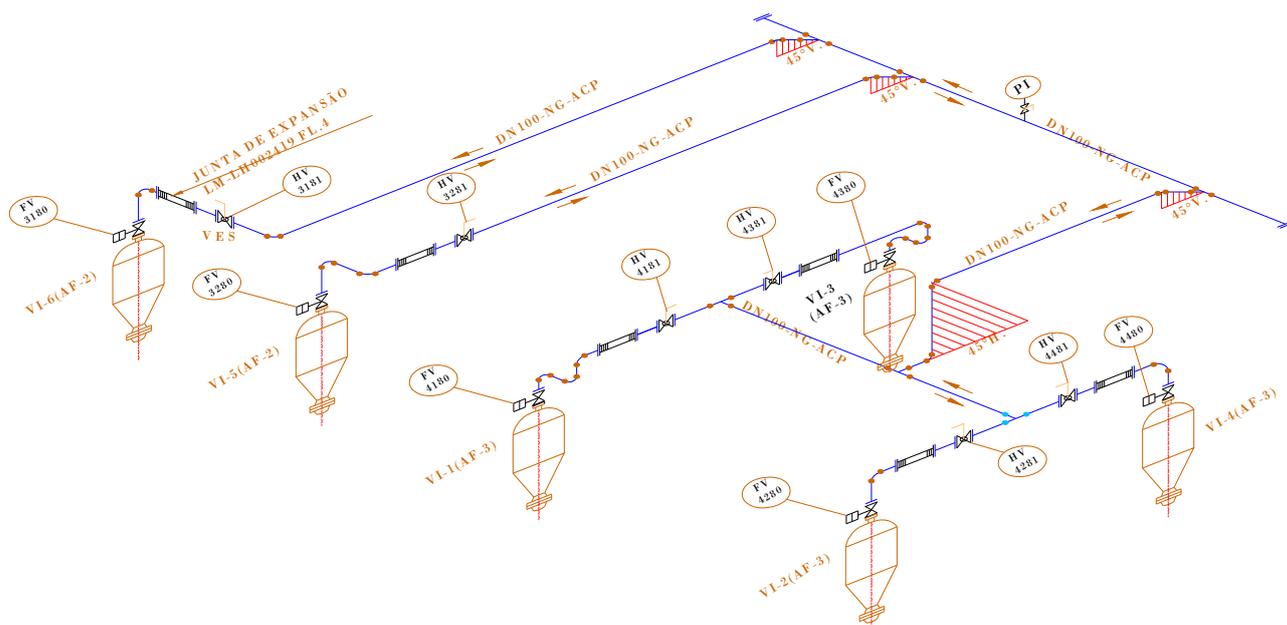


Figura 4.7 - Diagrama isométrico da linha de pré-pressurização

Neste caso, o tempo de espera ocorrerá após o sinal obtido 10 s após o fechamento da válvula de alívio em condições normais de operação. No início da fase de pré-pressurização, o vaso se encontra carregado e despressurizado, porém receptivo ao N_2 de baixa pressão. Observa-se uma redução aproximada no tempo de pressurização rápida de 45 s, ou seja, um pouco mais que 25% e aproximadamente equivalente ao volume de nitrogênio adquirido durante a fase de pré-pressurização. O tempo de alívio permaneceu praticamente constante, pois seu tempo depende mais do PID do controlador de alívio do que da pressão do vaso a aliviar, uma vez que está ajustada de forma lenta para evitar oscilações na válvula de alívio. Os valores de tempo da tabela típicos encontrados após a implantação do sistema de pré-pressurização com vazão de injeção de 30 t/h.

A Figura 4.8 ilustra a tela gráfica desenvolvida no SDCD para se visualizar os vasos com suas válvulas automáticas de pré-pressurização obtendo uma visão geral do sistema de pré-pressurização com nitrogênio de pressão baixa para os vasos de injeção. Assim, tem-se uma visão geral das variáveis de processo dos seis vasos interligados através de válvulas automáticas de 4" de diâmetro, tubulações, juntas de expansão e válvulas manuais, montando o sistema de pré-pressurização.

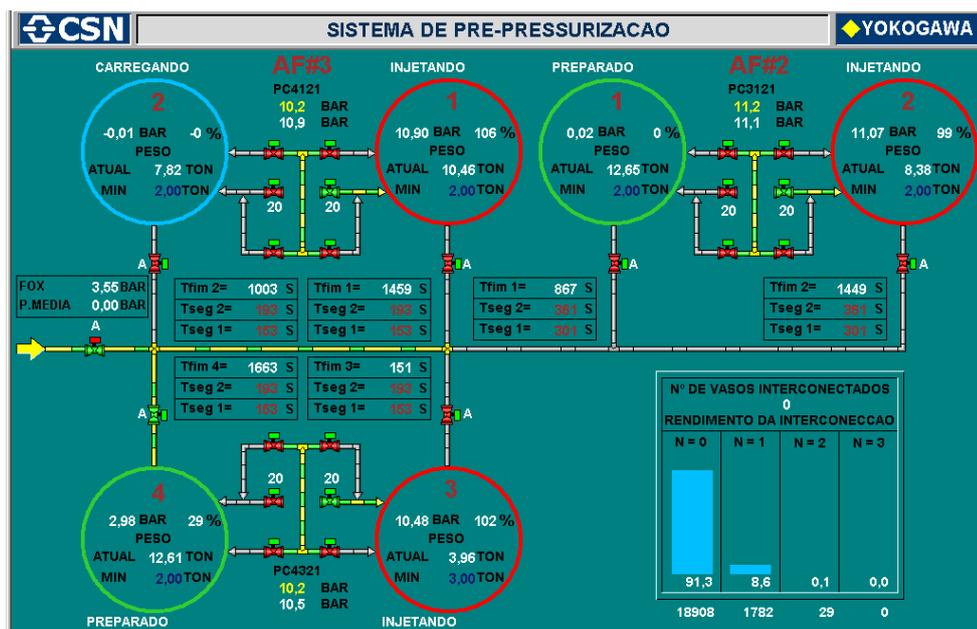


Figura 4.8 - Sistema de pré-pressurização dos vasos de injeção

O gráfico em forma de histograma percentual na Figura 4.8 embaixo a direita, é atualizado em tempo real e zerado a cada 28000 s, quando uma nova análise é reiniciada. Ele mostra quatro medições de tempo em função do número de vasos conectados a rede de N₂ de baixa pressão.

O número de vasos conectados a rede de N₂ de baixa pressão pode variar de 0 a 3. Nunca mais que isto, pois normalmente têm-se no máximo três vasos injetando para os altos fornos. Os tempos são relacionados percentualmente com o tempo de análise decorrida desde o zero periódico do temporizador.

A pressão média dos vasos interconectados a rede de N₂ de baixa pressão em bar é calculada somando-se a pressão individual dos vasos conectados e dividindo pelo número de vasos conectados, conforme ilustra a Fórmula (4.15):

$$P_{Média} = \frac{(P_1 + P_2 + \dots + P_N)}{N} \tag{4.15}$$

Onde:

P₁, P₂,P_n: Pressão do vaso N conectado a rede de nitrogênio de baixa pressão;

N: Número de vasos interconectados.

Este cálculo é usado no intertravamento das válvulas de pré-pressurização, que só abrem caso a pressão do vaso em pré-pressurização seja 10% maior que a pressão média dos vasos interconectados, conforme ilustra a Equação (4.16):

$$PV > 1,1 P_{Média} \tag{4.16}$$

4.13 PRESSURIZAÇÃO DO ANEL DE FLUIDIZAÇÃO DOS VASOS

Neste item será realizada uma avaliação do problema para justificar a necessidade das mudanças melhores no projeto original da Claudius Peters com a implantação da pressurização do anel de fluidização dos vasos de injeção de carvão pulverizado.

A partir daí, será apresentado o problema real, uma solução intermediária de custo baixo e posteriormente a solução final para evitar que a vazão de fluidização seja direcionada para dois vasos ao mesmo tempo. Isto visa minimizar a variabilidade da vazão de carvão pulverizado na linha principal de transporte pneumático durante a fase de pressurização e o processo de injeção.

4.14 PROBLEMA DA FALHA NA VAZÃO DE FLUIDIZAÇÃO

O projeto original de injeção de carvão pulverizado da Claudius Peters [4], não conhecia o problema da obstrução dos filtros de bronze sinterizados com conseqüente variação na vazão de carvão pulverizado.

Durante a fase de injeção, o vaso necessita de uma vazão de transporte e fluidização bem como a pressão de injeção, constantes e estáveis.

Através de observações, notou-se que no início da fase de injeção, quando o vaso possuía de 100 a 80% de seu peso máximo, ocorria entupimento na linha de fluidização ocasionando grandes perturbações no controle da vazão de carvão para os altos-fornos.

Quando o vaso tinha aproximadamente entre 80 e 60% do seu peso injetado, ocorria o desentupimento espontâneo da linha de fluidização, o que ocasionava nova perturbação nos controles de vazão, pressão e principalmente de vazão de carvão, alterando consideravelmente a temperatura da chama dos altos-fornos.

Com auxílio da observação das variáveis de processo em gráficos de tendência e com auxílio de manômetros durante a fase de alívio, a fase de pressurização e a fase de injeção chegou-se a causa fundamental do entupimento dos filtros de bronze sinterizados localizados no cone base dos vasos de injeção: Falta de contra pressão no anel de fluidização durante a fase de pressurização.

O filtro de bronze sinterizado tem a finalidade de evitar o retorno do carvão pulverizado e conseqüentemente o entupimento da linha de pressurização do anel de fluidização de carvão pulverizado. Ele é instalado dentro da união entre a capa do fluidizador e o flange. Ele é acoplado no tubo fluidizador, que serve de transporte para a inserção de nitrogênio dentro do cone de fluidização do vaso de injeção.

A Figura 4.9 ilustra o conjunto montado do fluidizador constituído de tubo, filtro de bronze sinterizado e capa.



Figura 4.9 - Conjunto montado do fluidizador do vaso

O entupimento do conjunto de fluidização ocorre pelo acúmulo de carvão entre a capa e o filtro de bronze sinterizado devido a pressão interna do vaso ser maior que a da câmara do conjunto fluidizador.

Para minimizar este problema, foi instalado um sétimo fluidizador cuja função adicional é aumentar a fluidização do vaso de injeção, ampliando a zona de baixa densidade no cone base do vaso de injeção visando maior fluidez do carvão pulverizado e melhorando a constância da vazão de carvão pulverizado.

O outro efeito desejado do sétimo fluidizador é a diminuição do tempo de pressurização do vaso proporcionado pela pressurização do anel de fluidização. Isto diminui o tempo total de preparo do vaso de injeção, em cerca de 1/3. A Figura 4.10 ilustra o fluidizador extra na linha no vaso de injeção 4 do AF3.



Figura 4.10 - Fluidizador extra

4.15 SISTEMA DE PRESSURIZAÇÃO DO ANEL DE FLUIDIZAÇÃO

O projeto de pressurização do anel de fluidização efetuado por Castro [45] orientado pelos trabalhos desta tese tem o objetivo de separar as linhas de fluidização dos dois vasos evitando que a vazão de fluidização seja direcionada para dois vasos ao mesmo tempo, minimizando a variabilidade da vazão de carvão pulverizado.

No projeto realizado pela CSN orientado por esta tese, foi construído um ramal de tubulação independente de 2" diretamente montado na linha principal de abastecimento dos tanques de armazenagem de nitrogênio. Esta montagem oferece a menor perda na carga na válvula de pressurização rápida e proporcionou um menor tempo de pressurização do vaso.

O novo sistema de pressurização do anel de fluidização tem por finalidade, evitar o entupimento dos filtros de bronze sinterizados localizados na base do vaso de injeção. A válvula automática de fechamento da pressurização do anel de fluidização é aberta na fase de pressurização rápida do vaso injeção e na fase de

pré-pressurização. Deste modo, sempre haverá uma contra pressão e fluxo pelos filtros fluidizadores evitando seu entupimento e futura falha na vazão de fluidização com conseqüente distúrbio na vazão de carvão pulverizado na linha principal de injeção para o alto-forno.

Uma solução de fácil implementação, porém momentânea para o problema descrito no item 4.14 anterior foi abrir a válvula de fechamento da vazão da fluidização durante as fases de pressurização, com o efeito positivo de não haver mais o entupimento do filtro de bronze sinterizado de fluidização do vaso. Assim, a primeira modificação no projeto de injeção de carvão pulverizado da CSN ocorreu em 2008 no início dos estudos da tese. Porém, como efeito negativo tem-se a oscilação na injeção devido à variação na vazão de fluidização do vaso que está injetando, pois ela tem que ser o mais constante possível.

A Figura 4.11 ilustra a modificação no projeto de injeção de carvão pulverizado da CSN em 2008, primeira tarefa da tese. As válvulas vermelhas estão fechadas e as verdes abertas. As linhas grossas representam passagem de vazão. As linhas pontilhadas representam malhas de controle.

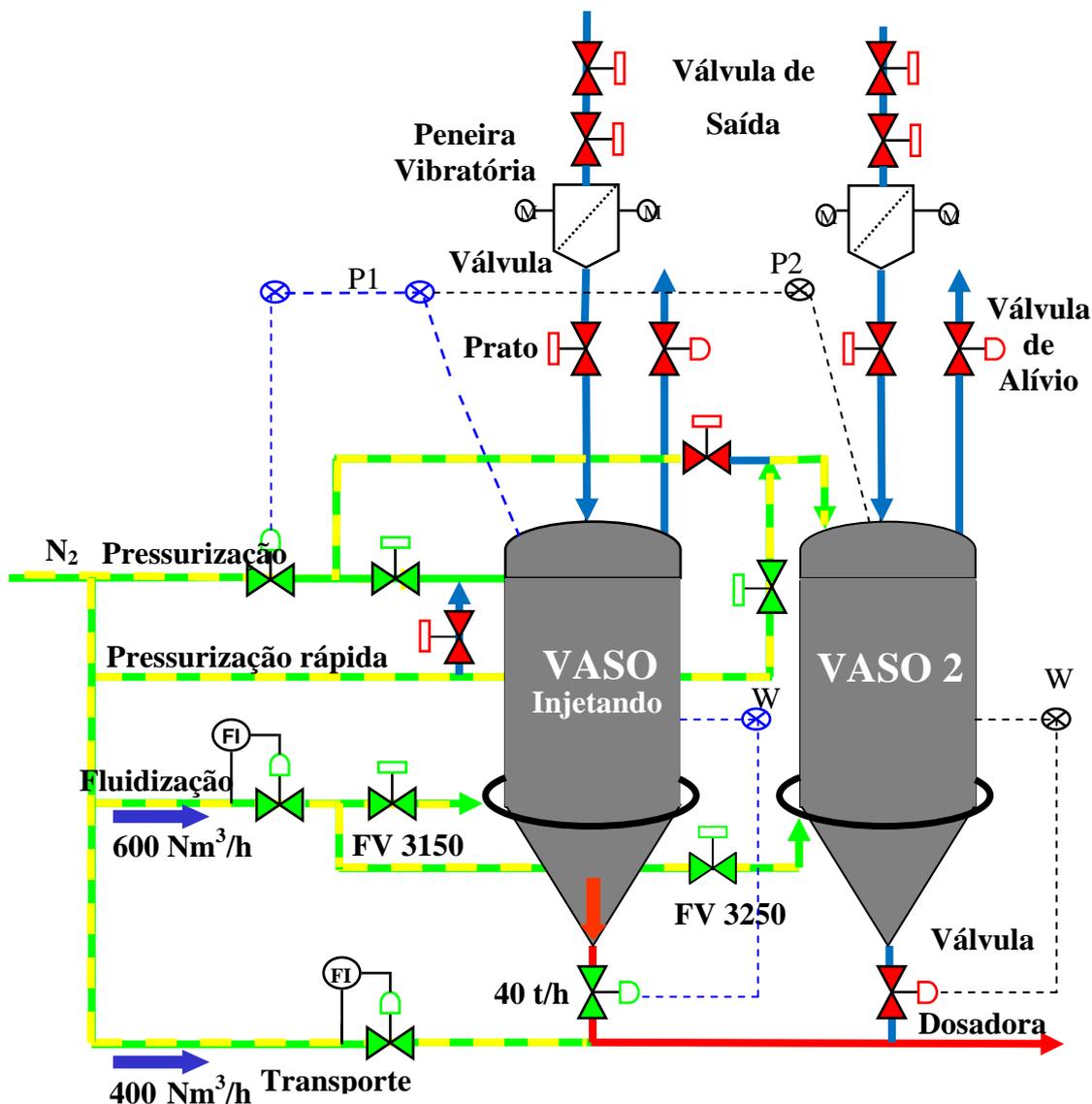


Figura 4.11 - Modificação no projeto da estação de injeção pela CSN em 2007

A Figura 4.12 ilustra o projeto final desta tese para eliminar os entupimentos dos filtros de bronze sinterizados foi executado em 2009 visando eliminar o entupimento dos filtros de bronze sinterizados com conseqüente falha na vazão de fluidização. Isto foi decorrente da experiência observação do processo no PCI da CSN, visto de se tratar do primeiro PCI com anel e controle de vazão de fluidização implantado no mundo. A válvula de pressurização do anel de fluidização foi colocada em paralelo com a válvula de pressurização rápida no mesmo ramal, conforme descrito no trabalho de Motta [46].

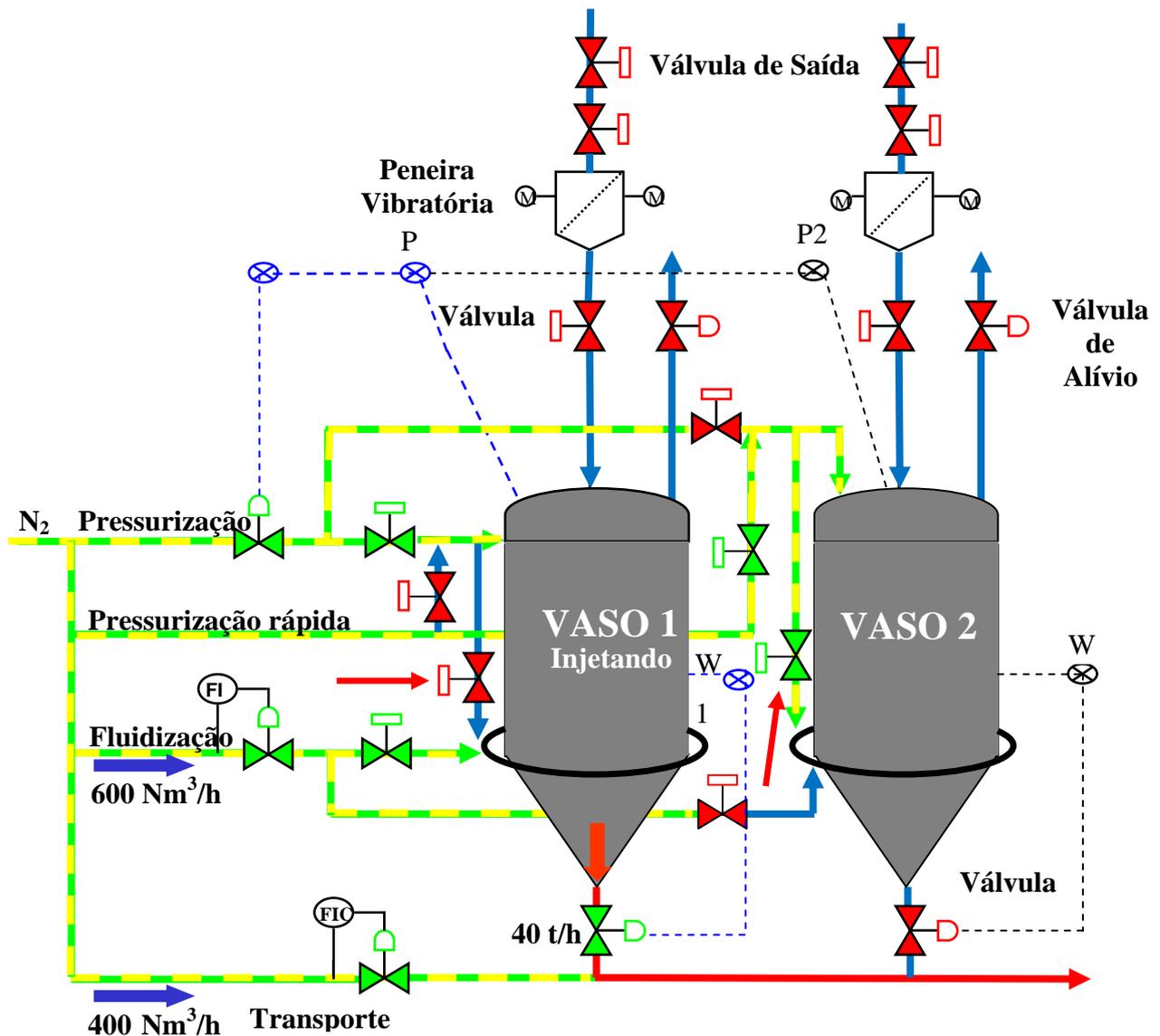


Figura 4.12 - Projeto da estação de injeção desenvolvido e implantado em 2009

4.16 RESULTADOS OBTIDOS

Novamente se, por exemplo, a taxa de injeção requerida pelo alto-forno for de 30 t/h, o “set-point” de pressão de injeção do vaso será de aproximadamente 10 bar, a pressão resultante da equalização dos vasos em 3,5 bar, resultando num tempo típico de pressurização de 100 s. Com a introdução do sistema de pré-pressurização de N₂ de baixa pressão, o tempo de pressurização efetuada pela pressurização rápida medido comprovadamente cai para estes patamares, quando ocorre uma pré-pressurização.

A Figura 4.13 ilustra a evolução da pressão interna do vaso no tempo somente com a válvula de pressurização rápida durante a fase de pressurização.

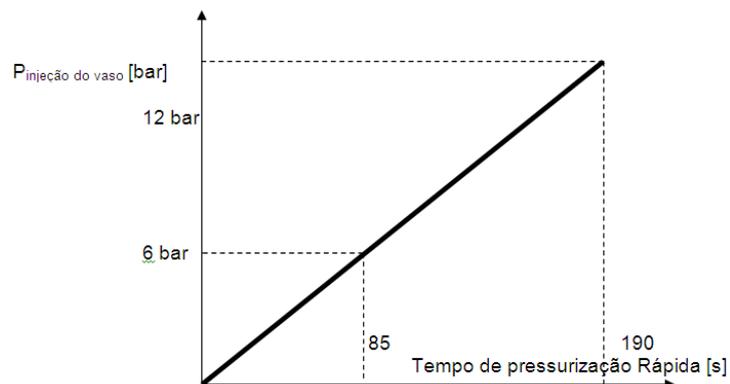


Figura 4.13 - Linearização para o tempo de pressurização rápida

A Figura 4.14 ilustra a união entre os gráficos da pré-pressurização (0 a 3 bar) e a pressurização rápida (3 a 12 bar).

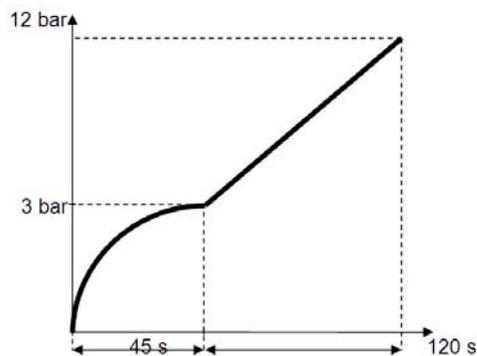


Figura 4.14 - Pré-pressurização e pressurização rápida

4.17 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Os resultados obtidos com as ações descritas neste capítulo da tese foram:

- 1 - Capacidade de injetar taxas maiores que 200 kg/t com uma maior oferta de carvão pulverizado o que possibilita a redução do custo do ferro-gusa;
- 2 - Monitoração dos tempos das fases dos ciclos das injeções proporcionando novas variáveis de processo;

- 3 - Diminuição dos problemas de carregamento dos vasos de injeção;
- 4 - Diminuição da variação de injeção devido à redução das trocas de vasos;

Finalmente, concluindo teve-se o fim das quedas de injeção devido aumento dos tempos disponíveis das fases dos vasos de injeção e cálculo da capacidade máxima de vazão de carvão da estação de injeção, orientando o operador do alto-forno quanto ao máximo “set-point” para a máxima vazão de carvão possível.

As melhorias efetuadas objeto deste trabalho reduziram a quantidade de interrupção no fluxo de carvão injetado em 36% e particularmente após a conclusão das implementações realizadas, em dezembro de 2008, não houve qualquer interrupção no fluxo de carvão injetado. Portanto, as plantas de injeção do PCI ficaram mais estáveis e confiáveis atingindo índices de disponibilidade médios de 99,98%, ou seja, 10 minutos de queda por mês por cada estação de injeção. Isto proporcionou a estabilidade operacional para o alto-forno gerando oportunidades para PCR maiores, vazões de carvão de até 50 t/h por estação de injeção sem interrupções. Além disto, houve melhorias consideráveis na vida útil dos equipamentos devido a essa otimização.

Após a implementação das ações, a inspeção operacional dos equipamentos se tornou mais fácil e mais freqüente nos pontos chaves de inspeção, garantindo uma confiabilidade maior da estação de injeção de carvão pulverizado é a estabilidade operacional dos altos fornos obtido pela vazão contínua de carvão.

O algoritmo de carregamento dos vasos de injeção garantiu o enchimento total da capacidade volumétrica do vaso sem causar interrupção na vazão de carvão por vaso não preparado.

A parada de injeção rápida eliminou a ocorrência do acúmulo de carvão no tubo reto e conjunto porta-vento aumentando a segurança do sistema.

As paradas de injeção por pressão diferencial junto com os procedimentos de abrir a válvula de transporte para a vazão máxima de nitrogênio eliminaram a ocorrência de estouro e arrebentamento dos tubos flexíveis de injeção das lanças nas salas de corridas dos altos-fornos.

A nova seqüência dos vasos de injeção é inédita em sistemas de injeção de carvão pulverizado e pode ser reproduzida em qualquer planta PCI já instalada.

O retorno econômico proporcionado com um processo de melhor eficiência energética justificou rapidamente o investimento no sistema de pré-pressurização e desvio de vazão dos compressores de nitrogênio. Isto aumentou a estabilidade da rede geral de nitrogênio de alta pressão estabilizando todas as malhas de controle da estação de injeção que dependem de uma alimentação estável de nitrogênio.

A Figura 4.15 a seguir ilustra a pressurização do vaso 3 em duas etapas, onde nota-se uma evolução exponencial de 1ª ordem para a pressão do vaso com nitrogênio de pressão baixa direto da FOX e uma segunda curva praticamente linear iniciando imediatamente após e terminando quando o “set-point da pressão de injeção é atingido.

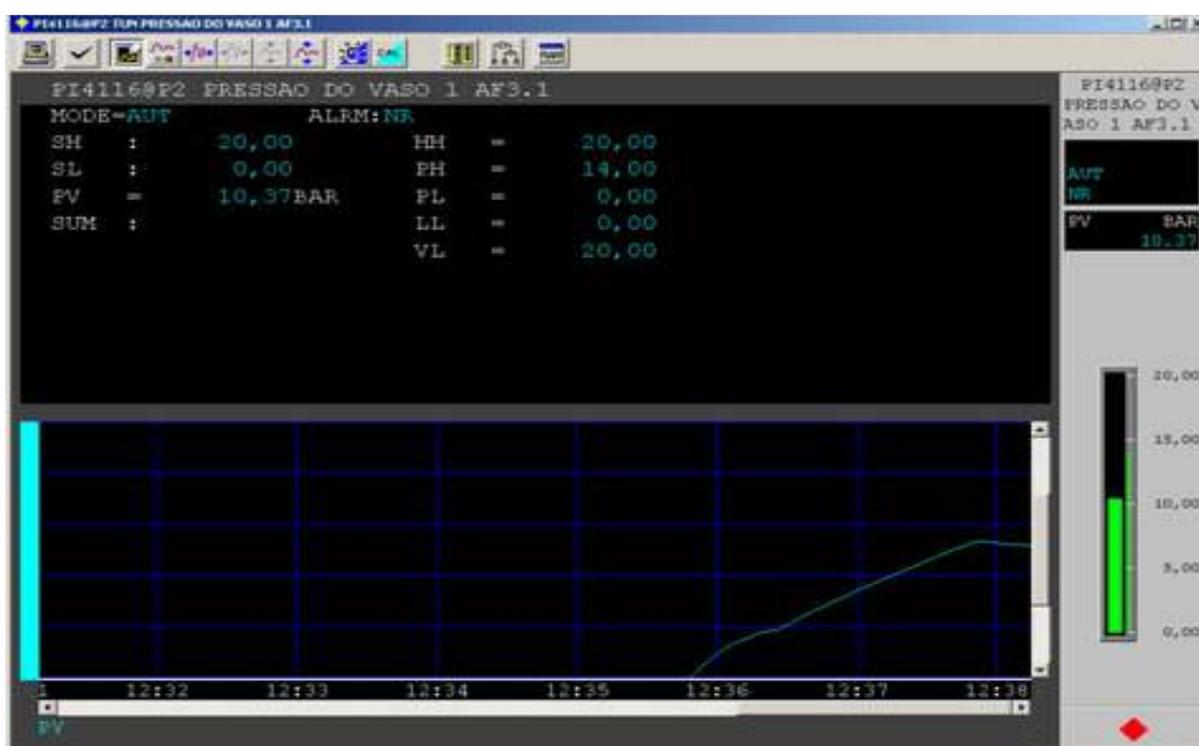


Figura 4.15 - Pressão do vaso 1 do AF3 durante a pré-pressurização

Melhoria intrínseca no processo das injeções devido a estabilidade da rede de nitrogênio de alta pressão, pois mantém todas as malhas de controle de vazão e pressão mais estáveis.

Maior tempo de vida das válvulas especiais de alívio e prato, pois o tempo de substituição passou de 3 meses para 9 meses, o que permitiu a troca durante as MPs (paradas preventivas) do alto-forno.

A nova linha de pressurização do anel de fluidização dos vasos de injeção de carvão pulverizado garante a contra pressão nos fluidizadores de bronze sinterizado nas fases de pré-pressurização e pressurização rápida sem alterar a vazão de fluidização do vaso oposto que se encontra injetando. Portanto, não é mais necessário abrir a válvula de fechamento automática de fluidização desviando assim a vazão de fluidização do vaso que está injetando.

A pressurização do anel de fluidização tem como finalidade principal pressurizar o anel de fluidização durante as fases de pré-pressurização e pressurização rápida. Isto evita que a vazão de fluidização flua para dois vasos ao mesmo tempo. Assim o controlador de vazão de fluidização fica dedicado exclusivamente ao vaso que está injetando contribuindo para a constância da vazão de fluidização.

Como consequência obteve-se uma redução na variabilidade da vazão de carvão pulverizado, aumentando o percentual de acerto na faixa ótima ($\pm 5\%$) de 60 para 65% em média, sendo a primeira contribuição de ganho notável com relação ao objetivo principal da tese.

A vazão nominal de carvão pulverizado das estações de injeção de projeto é de 40 t/h, suportando picos rápidos de até 45 t/h. Esta vazão é resultado dos tempos gastos pelas outras fases preparatórias do ciclo das injeções, exceto o tempo de injeção propriamente dito. Os trabalhos descritos em Motta [19] elevaram a capacidade nominal de injeção de 40 para 50 t/h suportando picos de até 55 t/h devido à redução dos tempos gastos nas fases de carregamento e pressurização.

O tempo de pressurização do vaso de injeção efetuado pela pressurização rápida é de 140 a 200 s dependendo da vazão de carvão solicitada pelo Alto-forno. Com o advento da pressurização com nitrogênio de pressão baixa ou pré-pressurização, houve uma redução deste tempo em cerca de 45 s conforme medições da Tabela 6.1, além da economia de energia elétrica. Isto também implicou num aumento de cerca de 5 t/h da capacidade nominal de injeção, visto que o tempo de preparação do vaso oposto foi reduzido devido à redução do tempo de pressurização. Com a pressurização do anel de fluidização, espera-se uma redução do tempo de pré-pressurização de 45 s para 35 s, e de 145 para 120 s no tempo de pressurização rápida, totalizando uma redução de 25 s. Portanto a capacidade máxima de injeção aumentou, contribuindo para a consolidação da capacidade nominal de 50 t/h, visada pelas ações e tarefas realizadas por Motta em [19].

Capítulo 5

Distribuição Uniforme de Carvão Pulverizado nas Ventaneiras dos Altos-Fornos

5.1 UNIFORMIDADE DE CARVÃO EM UM DISTRIBUIDOR ESTÁTICO

Este capítulo tem por objetivo elucidar as causas da distribuição não uniforme decorrente das oscilações das válvulas de carvão após o distribuidor. Esta oscilação causa uma grande variação de vazão de carvão de 100 a 0% num único Algarviz, alternado drasticamente a temperatura de chama do “Raceway” e trazendo instabilidade para o alto-forno.

A distribuição uniforme da vazão de carvão entre as ventaneiras do alto-forno em um distribuidor estático sem controle também pode ser melhorada. Trata-se da disponibilidade da lança para injeção. Normalmente, quando o Algarviz proporciona inspeção visual de injeção na ponta da lança, a válvula de carvão é aberta. Porém, podem ocorrer alarmes de vazão no tubo reto ou ainda alarmes de detecção de fluxo de carvão na linha ou nas lanças, o que pode ocasionar indevidamente sua retirada de operação.

Para cada linha individual de injeção de carvão pulverizado existe um sensor de fluxo, denominado “Granuflow”. Este sensor monitora constantemente a presença do fluxo de carvão pelas lanças de injeção e que na falta deste, enviará um comando para fechar a válvula de carvão e abrir a válvula de nitrogênio de purga para tentar desobstruir a lança, tal como visto em especial na literatura [47]. Existem diversos fabricantes destes detectores de fluxo de carvão [21], [48], [49] e [50]. A análise e teste de diversos detectores de fluxo de carvão são relatados em [51], sendo resultados das pesquisas orientadas por esta tese e necessárias para implantação da lança dupla de carvão.

Na linha individual de ar quente para cada ventaneira foi instalado para o AF2 transmissores de vazão e, para o AF3, transmissores de pressão diferencial, com o objetivo de monitorar a operacionalidade da ventaneira. Caso a ventaneira esteja obstruída, este sistema impedirá que a mesma continue a receber carvão, evitando o seu acúmulo no interior do algaraviz, o que levaria ao risco de explosões com conseqüente paralisação do alto-forno em emergência.

A Claudius Peters [4] projetou o PCI da CSN com distribuidor estático. Atualmente, para uma melhor distribuição uniforme entre ventaneiras existe o “upgrade” para o distribuidor dinâmico tal como descrito pelo artigo [52].

5.2 PURGA DAS LANÇAS DE INJEÇÃO

5.2.1 Purga programada

A purga das lanças de injeção consiste em fechar a válvula de carvão e abrir a válvula de N₂ de alta pressão por 90 s logo após a falta de fluxo de carvão.

Em seguida, a lança é posta novamente em injeção (válvula de carvão aberta e válvula de nitrogênio fechada) por um período de teste de 30 s. Se no final deste período, o sinal de fluxo de carvão não for normalizado, um alarme sonoro visual será emitido para o operador e um novo período de purga irá iniciar. Isto acontece indefinidamente se o operador não passar a lança para local e verificar na área da sala de corridas o entupimento ocorrido na lança.

Como medida preventiva contra entupimentos de lanças, foi desenvolvida e implantada a purga programada para acontecer a cada duas horas de funcionamento contínuo da injeção. Cada lança é colocada individualmente e em seqüência para purga durante 120 s para limpeza periódica.

5.2.2 Purga automática das lanças de injeção

O principal ganho da eliminação das oscilações das válvulas de carvão na saída do distribuidor é a distribuição uniforme de carvão entre lanças, objeto desta tese. Após a implementação, a inspeção operacional dos equipamentos do distribuidor tornou-se mais fácil e mais freqüente garantindo uma confiabilidade maior.

Outro ponto importante é a minimização das paradas de injeção que tem como causa o número mínimo de lanças, pois freqüentemente o “Granuflow” retirava a lança de injeção desnecessariamente.

Para garantir a segurança do sistema de injeção contra entupimento de lanças ou bloqueio do algaraviz devido a cascão no forno ou outra razão qualquer (o que levaria a um enchimento do algaraviz com carvão), um detector de fluxo de carvão (“Granuflow”) [48] em cada linha da lança de injeção é intertravado com suas respectivas válvulas de carvão e nitrogênio de purga. O mesmo acontece com os transmissores de vazão do tubo reto. Eles também intertravam as válvulas de carvão e nitrogênio tal como previsto pelo projeto original [4].

5.3 PROBLEMAS NA DISTRIBUIÇÃO UNIFORME

Foi notado que alguns “Granuflows” atuavam com mais freqüência que outros, retirando a lança de operação (carvão) com maior freqüência que as demais. Em alguns casos ocorriam até 50 atuações indevidas no período de duas horas da purga programada contra apenas uma atuação esperada, o que praticamente inviabiliza a operação da respectiva lança devido a elevada variação de injeção.

Assim foi desenvolvido um contador para os bloqueios da lança de carvão ocasionados por vazão baixa de carvão ou sopro no algaraviz. Estes contadores são zerados toda vez em que a purga programada é iniciada, ou seja, a cada duas horas. A Figura 5.1 ilustra um diagrama com os resultados destas contagens.

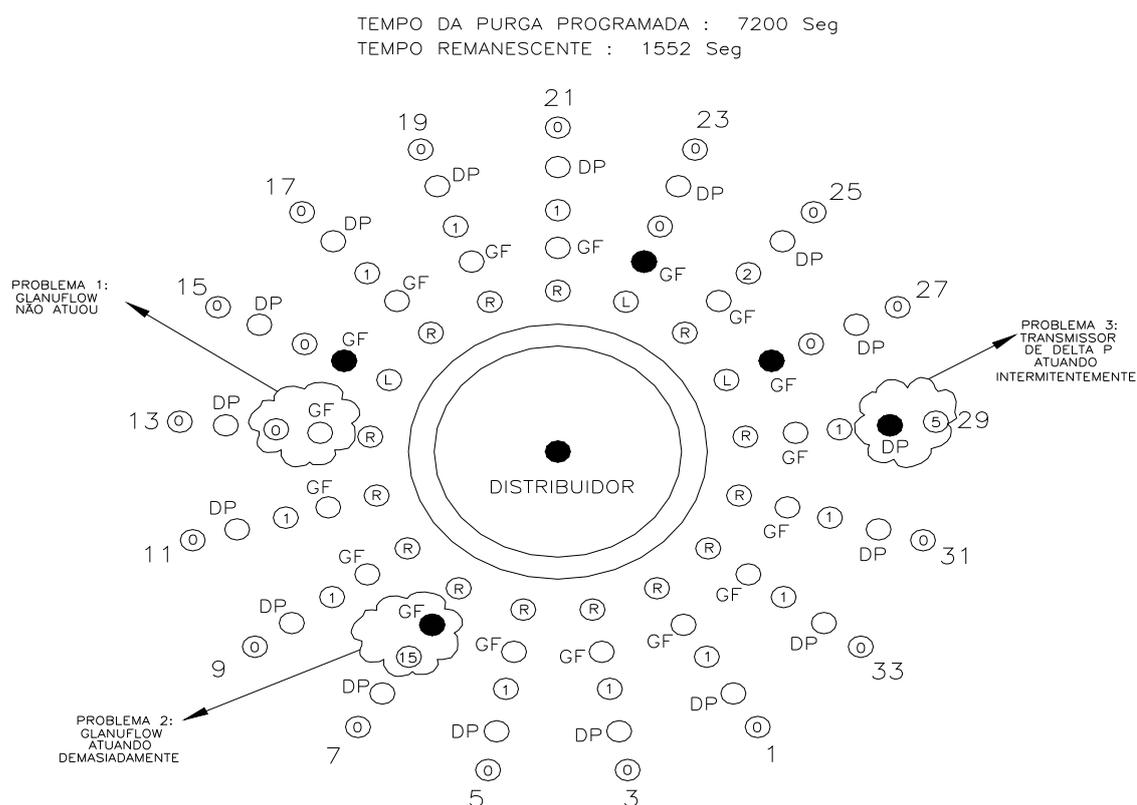


Figura 5.1 - Avaliação dos entupimentos da estação de injeção AF3.1

O desenvolvimento de programas de contagem de atuação dos “GranufloWS” e “Flow Jams” e alarmes de vazão do tubo reto fornecem diversas informações úteis a respeito do funcionamento destes equipamentos que são indispensáveis a segurança do PCI. O programa foi desenvolvido inicialmente com o objetivo único de analisar de entupimentos causados por coqueificação na ponta da lança de injeção devido à temperatura de fusão das cinzas da mistura de carvões injetados.

Existem três problemas típicos relacionados ao intertravamento da válvula de carvão que podem ser detectados com auxílio deste programa, a saber:

a - “Granuflow” não atuou

Durante o período de purga programada das lanças de injeção é evidente que o “Granuflow” tem que atuar pelo menos uma vez. Caso isto não ocorra, o contador do respectivo “Granuflow” irá marcar (zero) indicando falta de funcionalidade do equipamento, o que pode levar a um entupimento da respectiva lança de injeção, tal como o “Granuflow” da Lança 13 na Figura 5.1, que não atuou durante o período da purga programada, indicando que necessita ser verificado.

b - “Granuflow” atuando demasiadamente

É normal que neste período ocorram outras atuações (2 ou 3) além da purga programada devido a obstruções rápidas do próprio processo. Quando o índice de atuação do “Granuflow” for elevado (por exemplo: > 10 atuações em 2 horas), é necessário rever os ajustes de ganho e tempo do instrumento, reduzindo sua sensibilidade para que não atue indevidamente, tal como o “Granuflow” da Lança 7 na Figura 5.1 que atuou demasiadamente. Isto contribui em muito para uma distribuição desuniforme de carvão entre lanças, que é **contrária** as metas da tese.

c - Alarme de vazão de ar soprado do tubo reto

Outro resultado deste programa é na análise da estabilidade dos sinais que de vazão do tubo reto que também intertravam as válvulas de carvão. Defeitos como tomadas de impulso semi-obstruídas, curtos-circuitos intermitentes ou mesmo, características do processo dos altos-fornos tais como oscilações na pressão de ar soprado durante a equalização dos regeneradores podem levar a um excesso de atuações da válvula de carvão por alarme de vazão no algaraviz. Dos três diagnósticos listados em **a**, **b** e **c**, esse é o defeito de menor incidência.

5.4 PROGRAMAS DESENVOLVIDOS PARA MONITORAÇÃO DOS INTERTRAVAMENTOS DE SEGURANÇA DAS LANÇAS DE INJEÇÃO

a - Verificação periódica de funcionamento dos detectores de fluxo de carvão

Este programa tem a finalidade de verificar o afundamento dos detectores de fluxo de carvão e produz como resultado:

- Geração de 72 alarmes;
- Histórico de atuação dos detectores;
- Contagem em tempo real da atuação do detector de fluxo na linha e dos dois detectores de fluxo da lanças duplas.

O programa só ocorre durante a purga programa que usualmente possui um intervalo de tempo pré-ajustado em 2 horas. A purga programada ocorre a cada 2 horas quando cada lança é seqüencialmente colocada em purga por 1 minuto para que seja periodicamente executada uma limpeza com nitrogênio de alta pressão. Isto visa prevenir entupimento e retirar incrustações de carvão sinterizado na ponta da lança de injeção.

O algoritmo de contagem só permite sua realização durante a purga programada de cada lança que ocorre em períodos de 2 horas. Em um dia, 12 purgas programadas acontecem. A Figura 5.2 ilustra seu funcionamento.

Após o intervalo de purga individual de 90 segundos, os sensores tem que atuar acusando a passagem de somente nitrogênio.

Basicamente duas falhas típicas podem ser obtidas através da análise de atuação dos detectores durante a:

- Detector em falha ou não atuou (contagem em zero);
- Detector atuando muito. Precisa ter sua sensibilidade diminuída (contagem maior que a média).

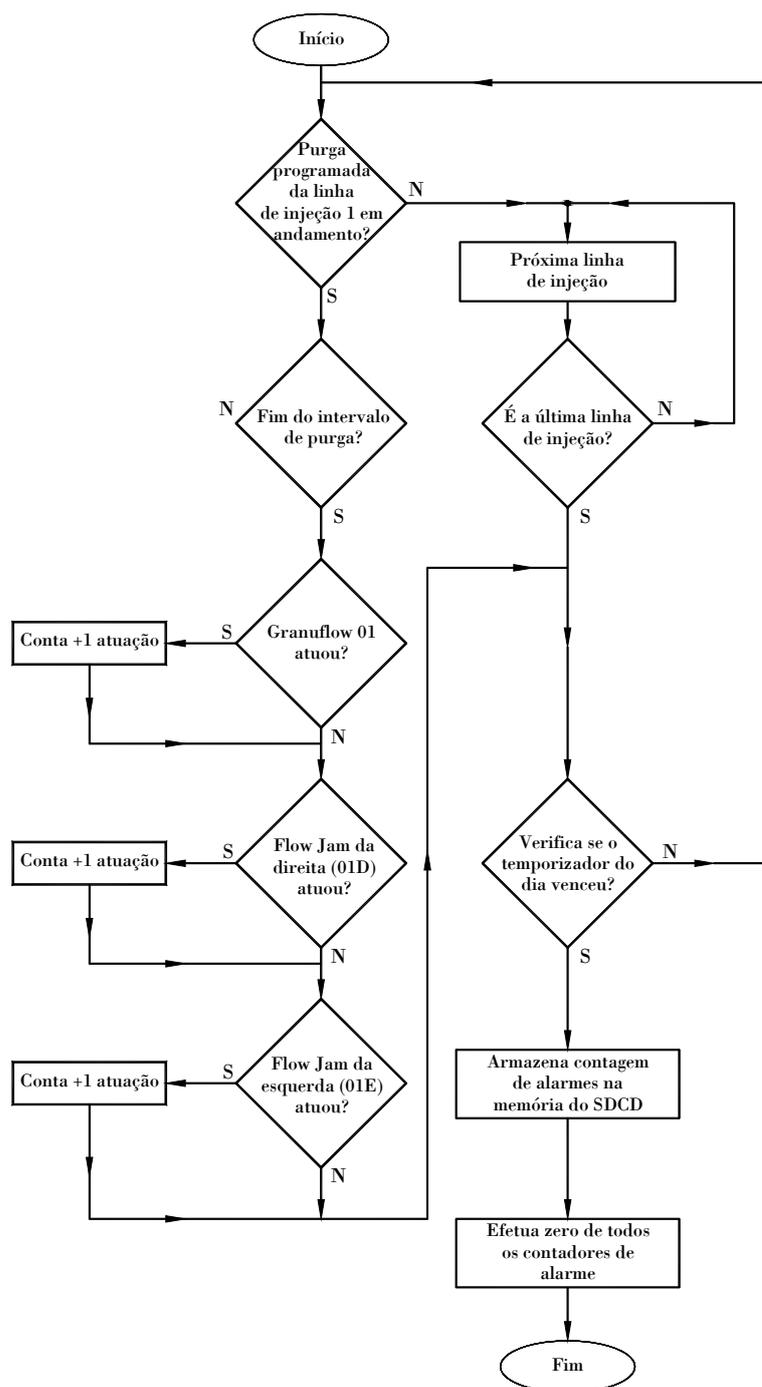


Figura 5.2 - Programa de análise de falhas nos detectores de carvão das linhas

b - Programa de contagem e determinação dos entupimentos em lanças de injeção

Este programa conta as atuações dos detectores de fluxo de carvão fora da purga programada e quando não há falha de fluxo de carvão. Este corte na linha individual de carvão é indesejável se ocorreu devido à informação falsa do detector de fluxo de carvão.

No caso do Alto-forno 2, que possuiu 24 ventaneiras, foram programados 72 contadores sendo:

- 24 contadores para “Granuflow” na linha;
- 24 contadores para “Flow Jam S” na lança da direita;
- 24 contadores para “Flow Jam S” na lança da esquerda;

Seu principal objetivo é contar os entupimentos de lanças de injeção bem como determinar a origem da detecção do entupimento (Granuflow, Flow Jam esquerda e Flow Jam direita).

A Figura 5.3 ilustra a contagem de atuação dos detectores de fluxo:

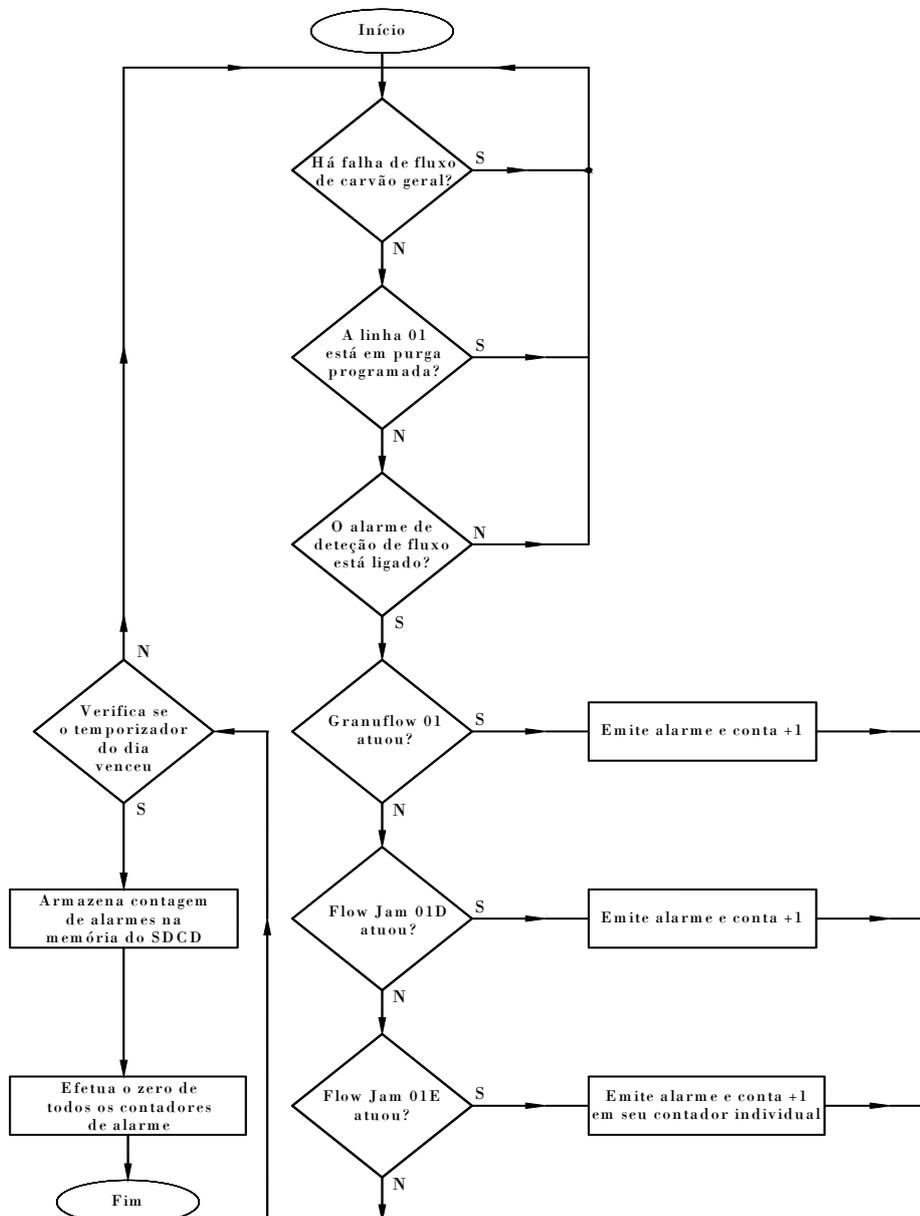


Figura 5.3 - Programa de contagem e determinação dos entupimentos das lanças de injeção

c - Programa de medição de atuação dos intertravamentos devidos a alarmes de vazão de ar soprado e detecção e fluxo de carvão nas linhas e lanças de injeção:

A Figura 5.4 ilustra o algoritmo de contagem dos alarmes de vazão.

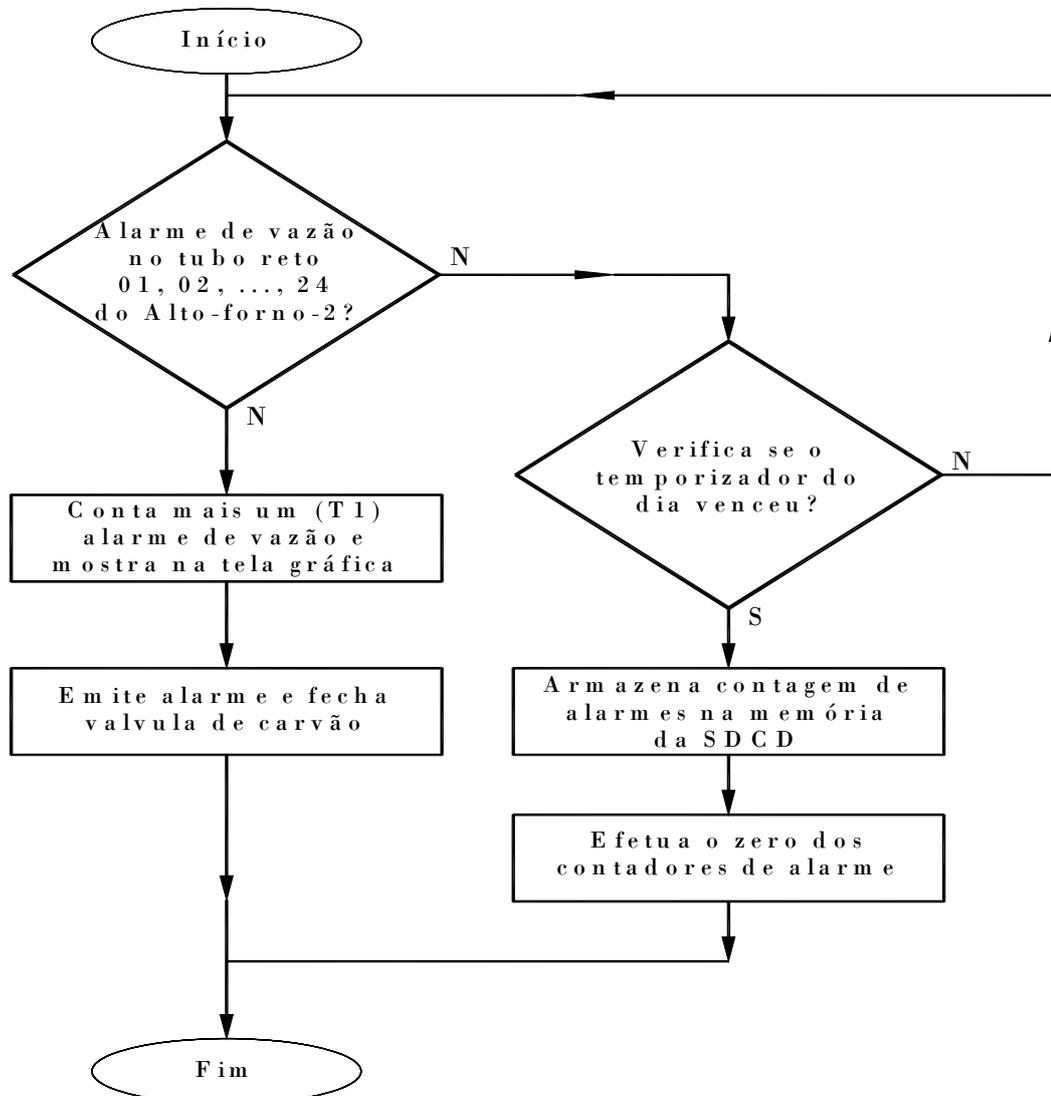


Figura 5.4 - Programa de contagem dos alarmes de vazão de ar soprados nos tubos retos

A Figura 5.5 ilustra a tela gráfica operacional do SDCD desenvolvida para mostrar os valores obtidos das contagens dos diversos eventos que ocasionam o fechamento da válvula de carvão após o distribuidor de acordo com os algoritmos descritos nos programas anteriores, e assim diagnosticar o problema corretamente.



Figura 5.5 - Programa de contagem dos alarmes de intertravamentos das válvulas de carvão

Para uma correta interpretação dos alarmes de vazão de ar soprado no tubo reto e dos alarmes de detecção de carvão na linha individual após a válvula de carvão do distribuidor ou ainda devido a alarme de detecção de fluxo de carvão era lança dupla após a bifurcação em “Y” para a lança dupla de injeção.

A contagem possui os valores acumulados da contagem atual dos alarmes. Quando o intervalo de amostragem vence, os valores acumulados dos contadores de alarmes são transferidos para as memórias, e os valores das memórias velhas são descartadas.

A memória contém os valores obtidos no intervalo de amostragem anterior e logo após o período de análise (1 dia). Após o período de análise, que pode ser visto no tempo para memória, todos os contadores são zerados para início de um novo período de análise das atuações dos intertravamentos.

5.5 INTERTRAVAMENTO DE SEGURANÇA DA VAZÃO DO TUBO RETO PARA INJEÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

O intertravamento de vazão de ar soprado dos tubos retos existe para que não ocorra a explosão do algaraviz, proveniente do acúmulo de carvão pulverizado injetado pelo sistema do PCI, através das lanças de carvão pulverizado e uma inexistência ou baixo sopro de ar quente. Isto não seria suficiente para queimar o carvão pulverizado no “Raceway”, sendo que o papel do transmissor de vazão é indicar o valor de vazão em cada um dos tubos retos e agir sobre o intertravamento, tal como descrito no trabalho [53].

Com este acúmulo de carvão na ventaneira, tem-se o triângulo do fogo completo, composto por: uma grande quantidade de carvão acumulado (combustível), ar quente soprado (ar + ignição), onde a principal perda é a parada do alto-forno em emergência por arrombamento do algaraviz.

O sistema de injeção de carvão pulverizado deverá por segurança fechar a válvula de carvão e acionar automaticamente a respectiva válvula de nitrogênio de pressão alta para purga e refrigeração, evitando assim o acúmulo de carvão no interior do algaraviz. Um entupimento no algaraviz ou na ventaneira devido a deslocamento de cascão pode causar a explosão do conjunto porta-vento com conseqüente parada de emergência do Alto-forno devido ao acúmulo do carvão injetado e não queimado.

A Figura 5.6 ilustra a localização das tomadas de pressão do transmissor de vazão, além da operação normal e anormal do algaraviz.

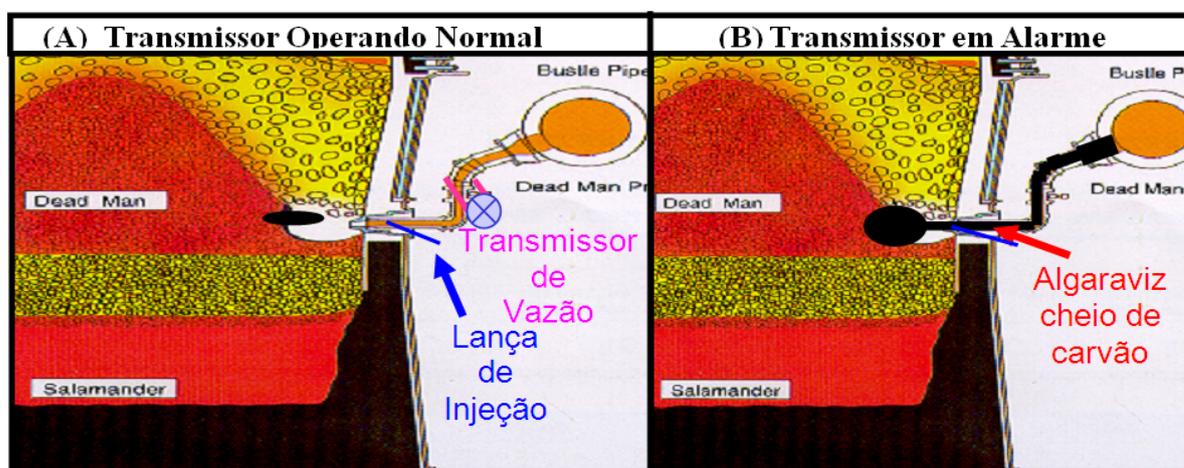


Figura 5.6 - Transmissor de vazão do tubo reto operando normal e em alarme

A realização deste item do trabalho de tese teve o propósito de aumentar o nível de segurança e intertravamento dos altos-fornos da CSN, com relação a vazão de ar quente soprado e para o novo projeto de injeção em lança dupla de carvão pulverizado. Para o desenvolvimento deste trabalho, foram observadas e analisadas condições as causas fundamentais e as críticas ou inseguras, quanto ao sopro de ar quente do alto-forno, com o intuito da melhoria do sistema estudado. Com a realização do trabalho, foram solucionados vários problemas ocorridos no passado, quanto à segurança do processo. O desgaste das válvulas de carvão pulverizado e válvulas de purga foram reduzidas devido a identificação específica em caso de alarme por vazão e uma lógica contemplada para o sistema de injeção por lança dupla de carvão em mesmo algaraviz. A segurança dos equipamentos e pessoas envolvidas na sala de corridas foi significativamente aumentada.

O equipamento que monitora a vazão de ar soprado no tubo reto é o transmissor de vazão visto com maiores detalhes no artigo [54] resultado desta tese. Caso haja algum bloqueio ou entupimento do algaraviz/ventaneira, o alarme por vazão baixa com valor estipulado para o Alto-forno 3 de 80 m³/min e para o Alto-forno 2 de 60 m³/min na CNTP será acionado. As válvulas de purga serão acionadas automaticamente evitando assim o acúmulo de carvão no interior do algaraviz. O intertravamento de vazão realiza a operação de fechar a válvula de carvão pulverizado, para que não acumule carvão no algaraviz e ocorra o risco de explosão. Outra função é refrigerar a lança, evitando sua queima e empenamento.

5.6 INTERTRAVAMENTO DE VAZÃO DE SOPRO PARA PCI

A lógica original de intertravamento da vazão de sopro para a injeção de carvão pulverizado, [4] PCI, é descrita a seguir: Quando a vazão de ar soprado de cada tubo reto medida for menor que o valor de alarme ajustado, o sistema fecha a válvula de carvão no distribuidor e a abre a válvula de N₂ de purga, da lança que injeta neste algaraviz. Isto garante a refrigeração da lança além de não acumular carvão na ventaneira. A lógica do intertravamento original é descrita a seguir:

- Alarme de vazão baixa (FI.LOW): este alarme é responsável por detectar cascão na ventaneira, ou seja a vazão baixa; e

- Habilitação do transmissor de vazão (FI.Habilitado): esta chave, controlada pelo operador, é responsável pela habilitação do transmissor de vazão.

A Figura 5.7 ilustra a lógica original fornecida como engenharia básica pelo fabricante e fornecedor da tecnologia do PCI da CSN, Claudius Peters [4].

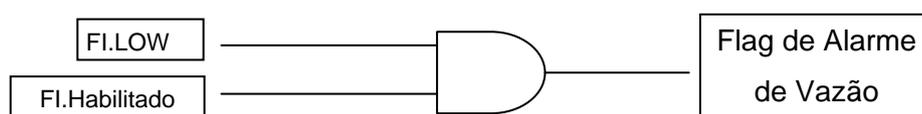


Figura 5.7 - Lógica original da Claudius Peters. [4]

Alguns dos riscos inerentes do intertravamento baseado no ar soprado passando pelo tubo reto juntamente com a injeção de carvão são, por exemplo:

- transmissor de vazão do tubo reto em curto-circuito ou aberto;
- tomada de impulso de pressão de alta ou baixa obstruída;
- cascão na ventaneira;
- desgaste da restrição (Venturi de refratário interno ao tubo reto);
- pressão remanescente na célula de delta P do transmissor de vazão.

Outro problema encontrado foi a grande oscilação de abertura e fechamento das válvulas de carvão e purga, ocasionadas pela variação de vazão no limiar entre o valor normal de operação e o valor de alarme de vazão baixa. Com este tipo de comportamento se tem um grande desgaste das válvulas automáticas pneumáticas, reduzindo assim a vida útil das esferas das válvulas. Cabe ressaltar que no total são 76 válvulas tipo esfera de fechamento automáticas para o Alto-forno 3 e 48 para o Alto-forno 2.

5.7 NOVOS INTERTRAVAMENTOS PARA A VAZÃO DO TUBO RETO

A nova lógica de intertravamento de segurança para a vazão de ar soprado pelo tubo reto descrita em [55] e orientada pelos trabalhos desta tese contempla após o desenvolvimento cinco novas condições, a saber:

- Alarme de vazão baixa (**FI.LOW**): este alarme é original do projeto do PCI da Claudius Peters. Sua função é detectar cascão na frente da ventaneira bem como indicar tomada impulso de alta obstruída.
- Alarme de vazão alta (**FI.HIGH**): este alarme é responsável por detectar a tomada de impulso de baixa do transmissor obstruída ou o arrombamento do algarviz. Se não fosse criado este alarme, ocorreria a medição de forma errada, não indicando a vazão real, o que poderia provocar até mesmo a explosão do algarviz.
- Alarme de malha aberta (**FI.IOP -**): este alarme é responsável por detectar o fio de instrumentação do transmissor aberto. Se não fosse criado este tipo de alarme, poderia ocorrer o intertravamento erroneamente, já que a vazão poderia estar em um nível normal de operação, mas o transmissor indicar a vazão em zero.
- Alarme de malha em curto (**FI.IOP**): este alarme é responsável por detectar transmissor de vazão em curto. Se não fosse criado este alarme, poderia não ocorrer à medição adequada pelo transmissor, podendo provocar até mesmo a explosão do algarviz, por vazão baixa, sem haver a indicação.
- Alarme de queda brusca da vazão (**FI.VEL-**): este alarme é responsável por detectar cascão no algarviz com a vantagem de não precisar de limite inferior (FI.LOW) ou tomada de impulso de alta obstruída;
- Alarme de queda brusca da vazão (**FI.VEL+**): este alarme é responsável por detectar o arrombamento ou tomada de impulso de baixa obstruída.

Além dos alarmes descritos anteriormente, existe a habilitação do transmissor efetuada pelo operador, como é mostrado a seguir.

A - Habilitação do transmissor de vazão (FI.Habilitado): esta chave habilita o monitoramento do sinal do transmissor de vazão, e efetua o “set” e o “reset” do “flip-flop”, na lógica de intertravamento;

B - Significado dos alarmes IOP e IOP-

Os alarmes IOP e IOP- são alarmes de falha que podem ocorrer na medição do transmissor de vazão:

- **IOP**: este alarme significa que a malha está recebendo um sinal maior que 21 mA, significando que os fios analógicos do transmissor de vazão podem estar em curto-circuito entre si ou para terra, ou outro defeito eletrônico qualquer do transmissor;
- **IOP -**: este alarme significa que a malha está recebendo um sinal menor que 3,9 mA, significando que o cabo analógico do transmissor de vazão pode estar com seu circuito aberto ou outro defeito eletrônico no transmissor.

C - Cálculos de VEL + e VEL -

Os valores máximos de variação (derivada no tempo) de vazão de ar soprado no tubo reto são mostrados na Tabela 5.1:

Alto-Forno	Faixa de Medição	Alarmes de VEL + e VEL -
2	0 a 200 m ³ /min	40 m/s
3	0 a 300 m ³ /min	50 m/s

A Figura 5.8 ilustra a variação brusca da vazão do tubo reto em função do tempo. Neste momento tem-se o alarme por VEL -, no Alto-Forno 2.

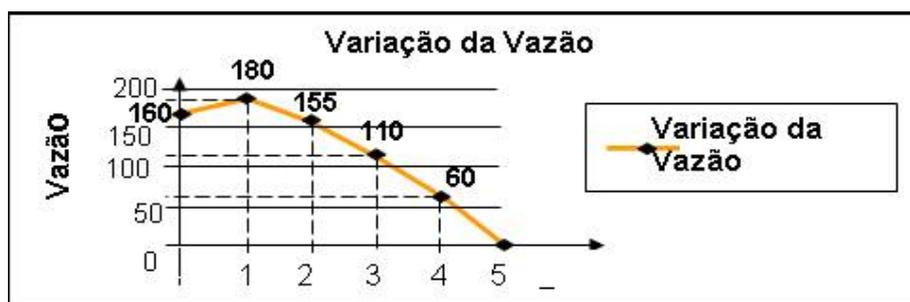


Figura 5.8 - Alarme de variação da vazão no tempo

Na Tabela 5.2, tem-se o resumo dos valores ajustados para o conjunto de alarmes para os Altos-fornos 2 e 3.

Alarme	AF#2	AF#3
LOW	60 m ³ /min	80 m ³ /min
HIGH	140 m ³ /min	250 m ³ /min
VEL_±	40 m ³ /min	50 m ³ /min

A lógica do aprimoramento do projeto original contemplou os novos alarmes de vazão do tubo reto. Além disto, foi acrescentado a lógica um “**Flip-flop**” tipo RS, que tem a função de manter a válvula de carvão sem oscilações na abertura e fechamento, no momento em que ocorrer as oscilação da vazão de ar soprado pelo tubo reto entre o valor limiar do alarme de vazão baixa e normal de operação.

Os três gráficos da Figura 5.9 ilustram a vazão mínima do AF3 com alarme em de 80 m³/min e o comportamento da válvula de carvão com e sem o “Flip-flop”.

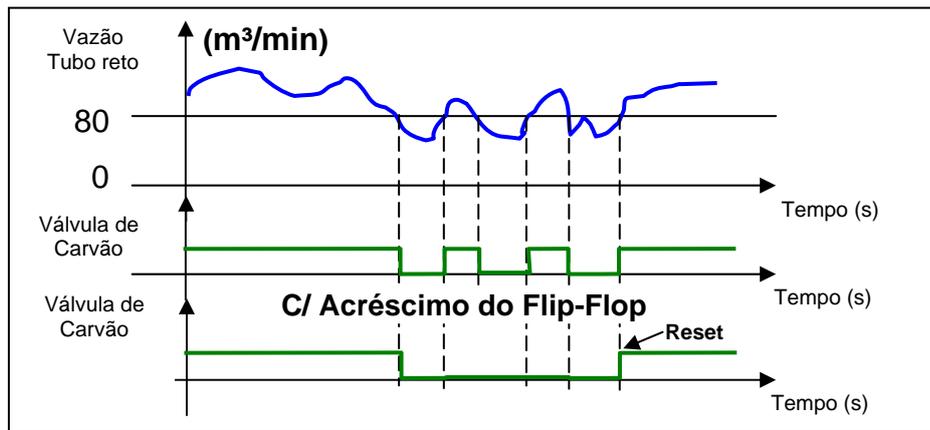


Figura 5.9 - Oscilações da válvula de carvão com e sem o “Flip-Flop”

A lógica destes novos intertravamentos e a incorporação do “Flip-flop” tipo RS, são mostrados na Figura 5.10 a seguir:

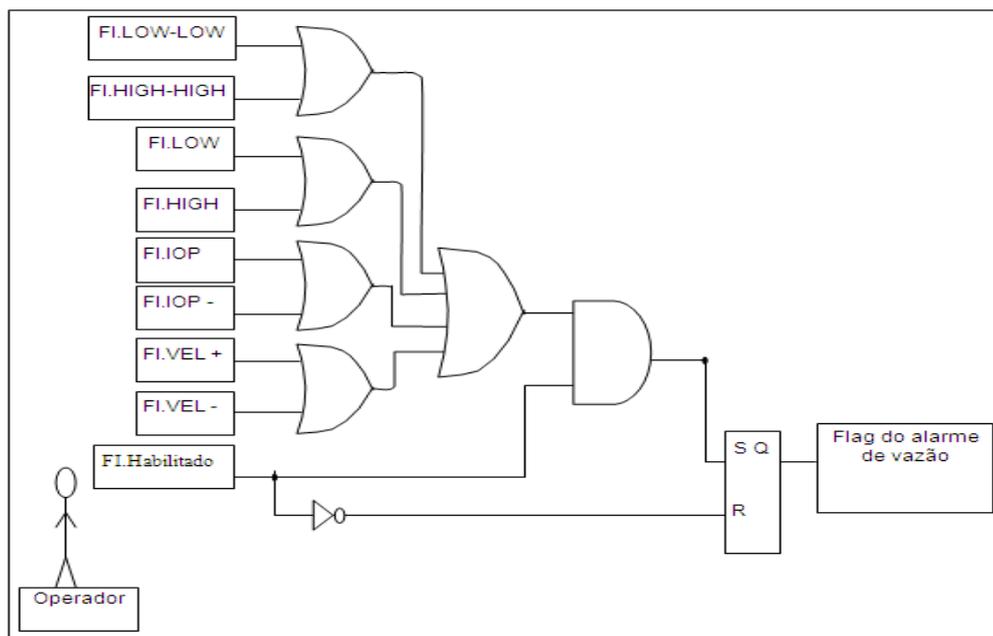


Figura 5.10 - Intertravamento de vazão e tabela de funcionamento do Flip-Flop

Após estas implementações, as oscilações das válvulas de carvão foram eliminadas resolvendo o problema da distribuição uniforme de carvão ao longo de todas as ventaneiras do alto-forno.

5.8 GERENCIAMENTO DAS LINHAS DE INJEÇÃO DE CARVÃO

O gerenciamento das linhas de injeção de carvão pulverizado é essencial para operação correta e segura da injeção do PCI. Nos anos de 2004, 2006 e 2007, houve três acidentes em que ocorreu a parada dos Altos-fornos 2 e 3, devido ao arrombamento dos algaravizes, com tempos de parada maiores que 24 horas.

Este incidente provém do fato de que um dia no passado, o operador inadvertidamente colocou uma linha para injetar, sem o algaraviz oferecer condições de sopro, o que levou a explosão e o arrombamento do mesmo horas depois.

Com estes acidentes ocorridos, foi necessário efetuar a implementação de um dispositivo, que informe a condição operacional para cada uma das linhas de carvão, evitando com isto, que a linha injete o carvão pulverizado sem ter condição. Por este motivo foi desenvolvida e implementada uma tabela de gerenciamento e filtro para as injeções de suas linhas de carvão, respectivamente para o AF2 e AF3.

A tabela de gerenciamento funciona da seguinte forma:

- na coluna **Lanças**, tem-se a identificação de cada lança de injeção do sistema original de injeção por lança simples;
- na coluna **Estado**, tem-se a condição, para a injeção da lança. Esta que tem o papel de fechar a válvula de carvão e abrir a válvula de purga da linha indicada, quando houver algum problema e se escrever algo diferente de "NORMAL", e quando esta tem condição de injeção é escrito "NORMAL", o que permitiu a injeção de carvão pela lança;
- a coluna **Data** indica que dia em que foi escrito algo na coluna **Estado**;
- a coluna **Ação** mostra as condições das lanças. Esta se altera de acordo com a coluna **Estado**, ou seja, coluna **Estado** em "NORMAL" coluna **Ação** "HABILITADA"; algo diferente de "NORMAL", "DESABILITADA". Como é mostrado nas Figuras 5.11 e 5.12.

A matriz de gerenciamento das lanças duplas em funcionamento deve ser atualizada toda vez em que a disposição das lanças na sala de corridas for modificada, principalmente na volta da MP (Parada programada para manutenção) do forno, tal como a Figura 5.11.

LINHA DE INJEÇÃO				LANÇA DUPLA - LADO ESQUERDO				LANÇA DUPLA - LADO DIREITO					
LANÇAS	ESTADO	DATA	AÇÃO	FJ	LANÇAS	ESTADO	DATA	AÇÃO	FJ	LANÇAS	ESTADO	DATA	AÇÃO
LINHA 1	NORMAL	16/06/2011	HABILITADA	○	1E	NORMAL	16/06/2011	HABILITADA	○	1D	NORMAL	16/06/2011	HABILITADA
LINHA 2	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	2E	NORMAL	28/01/2011	HABILITADA	○	2D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 3	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	3E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	3D	NORMAL	30/11/2009	HABILITADA
LINHA 4	NORMAL	NORMAL	HABILITADA	○	4E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	4D	NORMAL	29/04/2011	HABILITADA
LINHA 5	NORMAL	20/09/2010	HABILITADA	○	5E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	5D	NORMAL	28/04/2010	HABILITADA
LINHA 6	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	6E	NORMAL	14/06/2010	HABILITADA	○	6D	NORMAL	14/06/2010	HABILITADA
LINHA 7	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	7E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	7D	NORMAL	08/06/2010	HABILITADA
LINHA 8	NORMAL	18/03/2011	HABILITADA	○	8E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	8D	NORMAL	18/03/2011	HABILITADA
LINHA 9	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	9E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	9D	NORMAL	14/12/2006	HABILITADA
LINHA 10	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	10E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	10D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 11	NORMAL	27/04/2010	HABILITADA	○	11E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	11D	NORMAL	18/05/2011	HABILITADA
LINHA 12	NORMAL	27/04/2010	HABILITADA	○	12E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	12D	NORMAL	09/06/2010	HABILITADA
LINHA 13	NORMAL	27/09/2010	HABILITADA	○	13E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	13D	NORMAL	14/12/2009	HABILITADA
LINHA 14	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	14E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	14D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 15	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	15E	NORMAL	02/06/2011	HABILITADA	○	15D	NORMAL	05/01/2010	HABILITADA
LINHA 16	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	16E	NORMAL	04/06/2011	HABILITADA	○	16D	NORMAL	25/05/2010	HABILITADA
LINHA 17	NORMAL	22/02/2009	HABILITADA	○	17E	NORMAL	25/05/2010	HABILITADA	○	17D	NORMAL	16/06/2010	HABILITADA
LINHA 18	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	18E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	18D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 19	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	19E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	19D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 20	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	●	20E	NORMAL	20.12.10	HABILITADA	●	20D	NORMAL	24.07.10	HABILITADA
LINHA 21	NORMAL	06/09/2010	HABILITADA	○	21E	NORMAL	20.12.10	HABILITADA	○	21D	NORMAL	24.07.10	HABILITADA
LINHA 22	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	22E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	22D	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA
LINHA 23	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	23E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	23D	NORMAL	07/06/10	HABILITADA
LINHA 24	NORMAL	22/06/2009	HABILITADA	○	24E	NORMAL	20/06/2011	HABILITADA	○	24D	NORMAL	27.05.10	HABILITADA

Figura 5.11 - Operação das linhas de carvão do Alto-forno 2

5.9 INJEÇÃO EM LANÇA DUPLA EM MESMO ALGARAVIZ

A injeção em lança dupla traz uma melhor eficiência na queima do carvão pulverizado, reduzindo o “COKE RATE”. Maiores detalhes sobre lança dupla podem ser obtidos em [55] e [56]. Após a implantação inicial da lança dupla desenvolveu-se o intertravamento da vazão para injeção em algaravizes adjacentes. Na prática, a injeção em lança dupla em algaravizes adjacentes se mostrou confusa ao operador, e foi reprojeta em injeção por lança dupla de carvão em mesmo algaraviz. A Figura 5.12 ilustra a tela operacional implantada para a lança dupla de carvão.

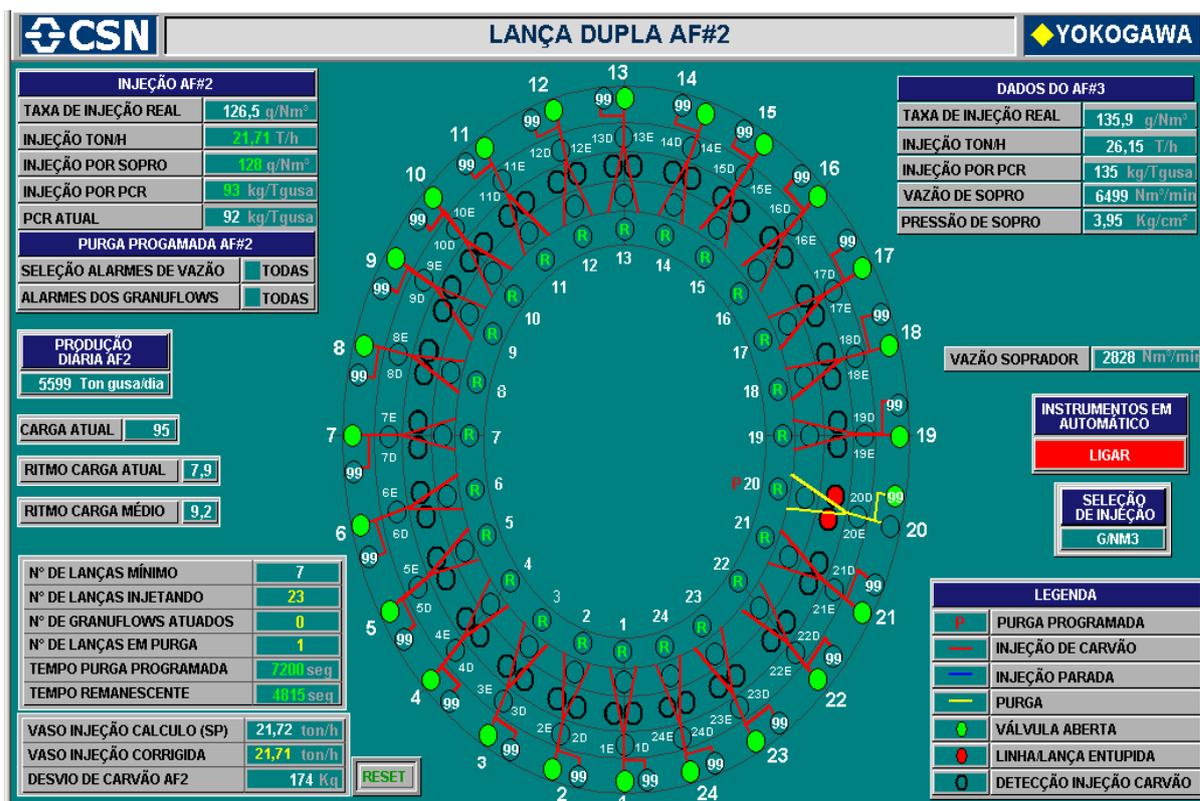


Figura 5.12 - Tela gráfica desenvolvida para operação da lança dupla de carvão do AF2

5.10 RESULTADOS E CONCLUSÕES

Após a implantação destas melhorias no controle de processo foi possível também iniciar estudos correlacionando o número de atuações (entupimentos de lanças) com a temperatura de fusão das cinzas do carvão que está sendo injetado. Isto forneceu maiores dados para o estudo da mistura de carvões que tem como objetivo uma maior combustibilidade e taxa de substituição alta, sem gerar entupimentos excessivos nas lanças de injeção.

Houve o aumento da segurança operacional do sistema de sopro dos altos-fornos da CSN com as telas gráficas de gerenciamento operacional das lanças de injeção de carvão que proporcionaram uma matriz filtro de software que aliada ao novo conjunto de intertravamento facilitou a operação das lanças de carvão, acabando com os problemas de segurança.

Os alarmes e intertravamentos de segurança para os transmissores de vazão proporcionaram a fácil identificação do problema pela equipe de manutenção do problema. O trabalho também aumentou a vida útil das válvulas automáticas de carvão e purga devido a redução do número de operações.

Com isto, no ano de 2009 foram feitos aprimoramentos das proteções de intertravamento da injeção, e desde então nunca mais foi noticiado a presença de carvão no interior do conjunto porta-vento (ventaneira, algaraviz, tubo reto).

A automação deste sistema veio a garantir a segurança do PCI, melhor atuação das válvulas no intertravamento, um primoroso controle do sistema por parte da operação. Além disto as modificações proporcionaram a implantação do projeto da lança dupla de carvão pulverizado em mesmo algaraviz utilizado nos altos-fornos da CSN entrasse em operação sem nenhum risco no processo de obtenção do gusa e pessoas envolvidas, e tornando o sistema mais versátil na injeção de combustíveis nos altos-fornos da CSN.

Este trabalho proporcionou novas lógicas de segurança para injeção de carvão do conjunto algaraviz, tubo reto e ventaneira, para a implantação do projeto da “Lança Dupla de Carvão Pulverizado nos Altos-Fornos da CSN”, na qual houve parte da alteração da lógica original do processo de injeção de carvão pulverizado antes efetuada para lança de injeção única (simples), sendo relatado em Nora [55].

Capítulo 6

A Correta Medição da Vazão de Carvão Pulverizado

6.1 OBJETIVOS DE SE DETERMINAR A VAZÃO DE CARVÃO

Diversas técnicas para medição da taxa da vazão mássica de sólidos granulados em tubulações pneumáticas têm sido propostas e desenvolvidas desde a década de 1960. Este capítulo apresenta as técnicas e as condições atuais relativas a medição de vazão que são classificadas em três categorias: medição direta da vazão mássica de sólidos, medição das concentrações volumétricas e da velocidade dos sólidos.

Os sistemas automáticos de controle de vazão de sólidos são mais especiais e complexos em relação àqueles controles automáticos para vazão de gases e líquidos. Os sistemas de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos, PCI, estão entre uma das aplicações mais típicas dos sistemas automáticos de controle de vazão de sólidos em sistemas industriais modernos.

O principal item de controle para o processo dos altos-fornos em relação à injeção de carvão pulverizado é a estabilidade da vazão de carvão na linha principal de injeção. Quanto mais estável, melhor a queima dos combustíveis e, portanto, maior a eficiência energética. As medições de vazão de sólidos são obtidas com o auxílio do cálculo da média móvel que obtém a taxa do decréscimo do transmissor de peso do vaso de injeção em intervalos regulares. Este valor de variável de processo é realimentado em uma malha de controle fechada com controlador tipo PID para manipular o elemento final de controle (válvula dosadora) de carvão. Este é o estado da arte descrito em Weber [4].

A correta medição da vazão de carvão pulverizado implica na variabilidade da quantidade de carvão injetado a longo prazo como será visto neste capítulo.

6.2 TÉCNICAS DE MEDIÇÃO DE CARVÃO PULVERIZADO

A técnica de medição de vazão de carvão pulverizado por célula de carga é realizada de modo indireto, pois não são instalados sensores na tubulação de transporte pneumático de carvão pulverizado. O resultado da medição de vazão é obtido por inferência através do ritmo do decréscimo do peso do vaso de injeção avaliado pela média móvel do último minuto anterior a medição atual.

Os vasos de injeção de carvão pulverizado são apoiados em três células de carga que são ligadas em um conversor de sinal. Não pode haver nenhum tipo de interferência mecânica tipo rigidez de tubulações como recomendado em [27]. Para tal são usadas juntas de compensação metálicas ou de borracha para que o vaso de injeção fique com seu peso apoiado exclusivamente sobre as três células de carga, [50]. A Figura 6.1 a seguir ilustra o vaso de injeção, as três células de carga e o sistema de pesagem:

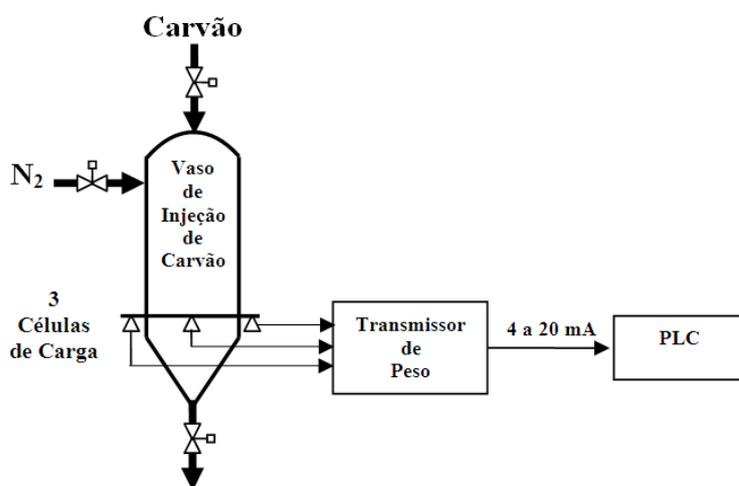


Figura 6.1 - Sistema de pesagem do vaso de injeção de carvão pulverizado

Os vasos de injeção possuem um sistema hidráulico especial com os pesos padrão conhecidos apoiados em cilindros hidráulicos para averiguação da calibração periódica do transmissor de peso. A resolução da medida no sistema de pesagem é de ± 5 kg numa escala de 15000 kg, fornecendo precisão de $\pm 0,03\%$.

Um algoritmo computacional subtrai o peso atual, $W(t)$, do vaso de injeção de seu peso adquirido no instante correspondente a 6 s antes da medição atual. De posse deste valor, a vazão de injeção instantânea é calculada e armazenada através de uma média de 10 valores em uma memória tipo FILO.

A vazão instantânea de carvão pulverizado horária $F(t)$ em t/h é calculada em tempo real no SDCD em toneladas por hora a cada $\Delta T = 6$ s. A Equação (6.1) ilustra:

$$F(t) = \frac{600 \times \{W(t-6) - W(t)\}}{\Delta T} \quad (6.1)$$

Onde:

600: quantidade de amostras de 6 s coletadas em uma hora;

$W(t)$: é o peso atual do transmissor de peso do vaso de injeção;

$W(t-6)$: é o peso do transmissor há 6 s atrás.

A Figura 6.2 ilustra o tratamento de sinal utilizado no trabalho:

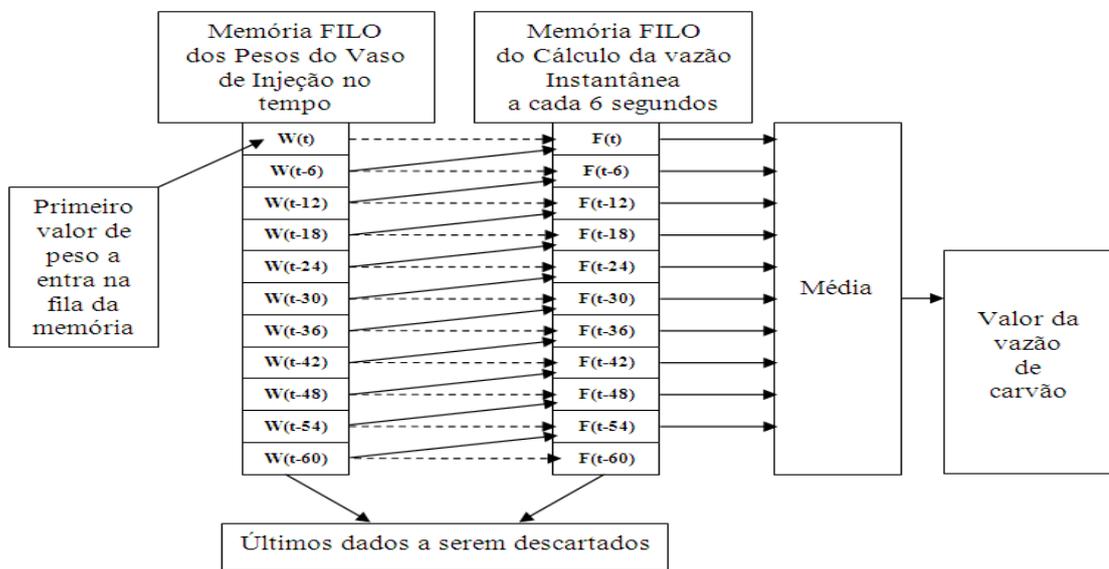


Figura 6.2 - Diagrama de obtenção do valor de vazão por células de carga

O valor de $V_z(t)$ é o valor usado como variável de processo da vazão de carvão do controlador principal cujo elemento final é a válvula dosadora logo abaixo do vaso. De uma maneira geral, a Equação (6.2) a seguir reproduz o cálculo do algoritmo da Figura 6.2 para obtenção da vazão de carvão média no último minuto:

$$V_z(t) = \sum_{i=0}^{N-1} \frac{F(t - Ti)}{N} \quad (6.2)$$

Onde:

N : é o número de amostras da média móvel ($N = 10$);

T : é o período de aquisição ou intervalo de tempo entre as amostras ($T = 6$ s).

Existem sistemas de medição de vazão de sólidos (EDG) onde $N=12$ e $T=5$ s, também reproduzindo a vazão média no último minuto.

6.3 O ERRO NA MEDIÇÃO DE VAZÃO POR CÉLULAS DE CARGA

O erro na medição de vazão de carvão por células de carga é descrito com o auxílio de um modelo dinâmico determinístico não linear e invariante no tempo tal como nos exemplos de [59], [60] e [61] para a medição do peso do vaso de injeção carvão. As Figuras 6.3.a e 6.3.b a seguir ilustram as variáveis de processo principais durante o início da fase de pressurização, início e final da fase de injeção dos vasos são destacados:

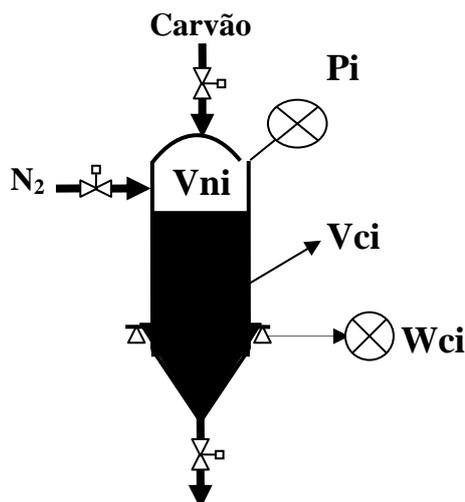


Figura 6.3.a - Início da fase de injeção

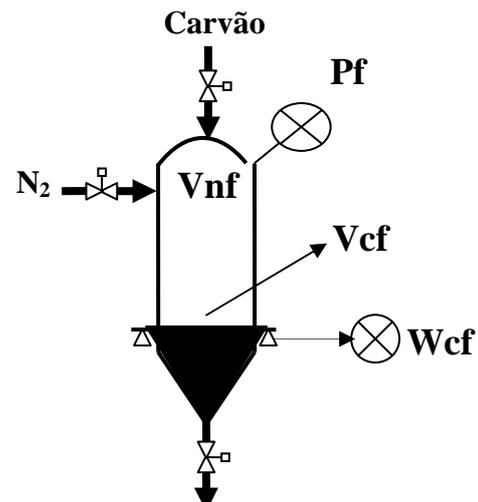


Figura 6.3.b - Final da fase de injeção

Nas Figuras 6.3.a e 6.3.b tem-se:

V : Volume do vaso de injeção (25 m^3 no caso da CSN);

V_{ni} : Volume inicial de nitrogênio;

V_{ci} : volume inicial de carvão ($20,5 \text{ m}^3$ no caso da CSN);

W_{ci_0} : peso inicial do carvão no vaso de injeção aliviado na pressão de bar;

W_{ci} : peso inicial do vaso de injeção (carvão + N_2), tipicamente $12,5 \text{ t}$;

V_{nf} : Volume final de nitrogênio;

W_{cf} : Peso final de carvão não injetado ou remanescente, tipicamente 2 t ;

W_{cf_0} : Peso final de carvão no vaso de injeção aliviado na pressão de 0 bar ;

Pi: Pressão de injeção inicial do vaso tipicamente 11 bar;

Pf: Pressão final = constante durante a fase de injeção tipicamente 11 bar;

W: medição de peso em tempo real do vaso de injeção.

No processo de medição da vazão bifásica de carvão e nitrogênio ocorrem as três etapas distintas:

1ª Hipótese:

Nas Figuras 6.3.a e 6.3.b, na fase de injeção ocorre o esvaziamento do carvão que é preenchido automaticamente por nitrogênio advindo da linha de controle de pressão controlada. Para condições iniciais, assume-se:

Pi = Pf = constante durante toda a fase de injeção na pressão de 11 bar.

O volume de nitrogênio inserido durante a fase de injeção para preservar a pressão do vaso constante substitui o volume de carvão pulverizado que possui densidade típica de 610 kg/m^3 . Este N_2 possui uma densidade diferente do carvão, o que influencia o resultado da medição da célula de carga, pois está sendo medido N_2 mais carvão ao invés da grandeza de interesse que é exclusivamente o carvão.

A balança de pesagem do vaso de injeção, $W(t)$ ou simplesmente W , não leva em conta o volume de nitrogênio inserido durante a fase de injeção para manter a pressão constante como se fosse carvão injetado. A taxa de variação do peso de carvão injetado menos a taxa de variação do peso de nitrogênio resulta em uma variação da mistura realmente medido pela célula de carga conforme a Equação diferencial (6.3) a seguir:

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} \quad (6.3)$$

Onde:

W: valor medido pelo sistema de pesagem (células de carga);

W_C : valor real da vazão de carvão (variável de interesse);

W_N : valor do peso de nitrogênio inserido na fase de injeção.

A Equação diferencial (6.3) mostra que o peso de carvão diminui com o tempo e o peso de nitrogênio inserido para compensar o volume de carvão enviado aumenta com o passar do tempo da fase de injeção. Porém, este peso do vaso de injeção decrescendo no tempo durante a fase de injeção leva em conta todo o peso do vaso de injeção (W).

Portanto, o volume do carvão que é injetado para o alto-forno é substituído gradualmente durante a fase de injeção por um volume de nitrogênio correspondente na mesma CNTP. Deve-se levar em conta que o nitrogênio é um gás que pode ser comprimido e o carvão não. Apenas o volume do carvão pode ser reduzido ao eliminar os espaços vazios entre suas partículas.

2ª Hipótese:

O peso de carvão dentro do vaso antes e após a pressurização com nitrogênio é praticamente o mesmo. Portanto, o arraste de carvão pela válvula de alívio durante a fase de despressurização é desprezível. Isto é importante para saber que o carvão que entra no vaso durante a fase de carregamento não retorna para o silo de finos através da válvula de alívio. Esta observação feita durante a elaboração da tese contrariou significativamente o conceito mostrado em [9] e [10] de que o carvão era eliminado durante a fase de alívio do vaso.

3ª Hipótese:

O carregamento do vaso oposto afeta a balança do vaso que está injetando em aproximadamente 50 kg. Portanto, a Equação (6.3) torna-se mais completa como a Equação (6.4):

$$\frac{dW}{dt} = \frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} - \frac{dW_{CO}}{dt} \quad (6.4)$$

Onde:

W_{CO} : peso de carvão acrescido devido ao carregamento do vaso oposto.

Aplicando a transformada de Laplace, tem-se a Equação (6.5).

$$s W(s) = s(W_C(s) - W_N(s) - W_{CO}(s)) \quad (6.5)$$

A função de transferência pode ser obtida pela Equação (6.6):

$$W(s) = W_C(s) - W_N(s) - W_{CO}(s) \quad (6.6)$$

Assim sendo, considerando os valores típicos de processo indicados nas Figuras 6.3.a e 6.3.b, pode-se obter um erro percentual típico para $V_z(t)$ de 30 t/h na pressão de 11 bar durante a fase de injeção, conforme mostrado a seguir:

$$W_{ci} = 12,5 \text{ t};$$

$$V_{ci} = 12,5/0,61 \approx 20,5 \text{ m}^3;$$

$$V_{ni} = 25 - 20,5 = 4,5 \text{ m}^3;$$

$$V_{cf} = 2/0,61 \approx 3,28 \text{ m}^3;$$

$$V_{nf} = 25 - 3,28 = 21,72 \text{ m}^3.$$

O volume de nitrogênio inserido ao longo da fase de injeção pelo controlador de pressão constante do vaso corresponde a diferença:

$$V_{ni} - V_{nf} = 17,22 \text{ m}^3.$$

O nitrogênio provém dos compressores e possui uma temperatura média de 20°C. Quando entra em contato com o carvão no vaso, sua temperatura se eleva para próxima a do carvão, visto que a quantidade de energia térmica armazenada no carvão é muito maior que no nitrogênio. Este volume pressurizado a 12 bar absoluto à 40°C possui um volume normalizado de:

$$\frac{1 \times V_{n_2}}{273} = \frac{(1 + 11) \times 17,22 \text{ m}^3}{273 + 40}$$

$$V_{n_2} \cong 180 [\text{m}^3]_{\text{nasCNTP}}.$$

Como a densidade do nitrogênio é de 1,2527 kg/m³ na CNTP de acordo com [62], este volume normalizado possui um peso aproximado de 225 kg por fase de injeção sendo aliviado para o silo de finos após o término.

Sabendo que o peso real de carvão foi de 10,5 t, o erro percentual aproximado previsto a mais a ser encontrado é:

$$\text{Erro1\%} = (10,5 - 0,225) / 10,5 \approx \mathbf{2,15\%}.$$

Somando-se + 50 kg introduzido pela pesagem do vaso oposto tem-se aproximadamente 275 kg de acréscimo de peso durante a fase de injeção.

$$\text{Erro2\%} = (10,5 - 0,275) / 10,5 \approx \mathbf{2,61\%}.$$

Pode-se dizer em vista dos resultados obtidos que o erro médio (entre 2,15% e 2,61%) esperado da integração da vazão calculada pelo sistema, $Vz(t)$ é da ordem de - 2,38% ou em média - 2,5% na vazão de carvão medida pelo SDCD.

O volume de nitrogênio que substitui o volume de carvão injetado possui nas CNTP um volume tal que dividido pela densidade do nitrogênio fornece um peso (W_N) aproximado de 250 a 350 kg em cada fase de injeção. Para integrações de longo prazo isto corresponde inicialmente cerca de 2 a 3% de erro, dependendo da pressão de injeção. Na média geral, pode-se adotar -2,5%, e o fator 600 da Equação (6.1) pode ser alterado para corrigir este erro na medição de vazão instantânea.

Para minimização deste erro, tem que se introduzir um fator de correção no cálculo da vazão de carvão pulverizado conforme ilustra a Equação (6.7)

$$V'z(t) = kVz(t) \quad (6.7)$$

O fator de correção k para a medição de vazão de carvão pode ser calculado de acordo com a Equação (6.8):

$$k = \frac{W_{ci} - W_{cf} - W_{nf}}{W_{ci} - W_{cf}} \quad (6.8)$$

O volume final de N_2 no final da fase de injeção (V_{nf}) pode ser calculado com o auxílio da Equação (6.9):

$$V_{nf} = \frac{(W_{ci} - W_{cf})}{\delta_c} \quad (6.9)$$

Entretanto, o nitrogênio é um gás compressível enquanto que o carvão naturalmente por se tratar de um sólido não é compressível. Portanto, o volume de nitrogênio que substitui o volume de carvão injetado na Equação (6.9) tem que ser normalizado para as CNTP e multiplicado pela densidade do N_2 , tal como ilustra a Equação (6.10) a seguir:

$$W_{nf} = \delta_{N_2} \frac{(273(1.0013 + P_i))V_{nf}}{273 + T_v} \quad (6.10)$$

Para uma integração em longo prazo (24 h), o fator de correção k que corresponde a faixa de erro de aproximadamente -2 to -3% varia de $k=0.97$ a 0.98 , pois k varia ligeiramente com a pressão e muito pouco com a temperatura. Assumindo que a média do erro é de -2.5% e para uma correção simples, adotou-se um k constante e igual a $0,975$.

6.4 QUANTIDADE DE CARVÃO INJETADO NO ALTO-FORNO

Para determinar o erro intrínseco da medição de vazão por células num processo de transporte pneumático foram efetuadas duas integrações para se obter a real quantidade de carvão injetado nos Alto-fornos 2 e 3 (rotas par e impar) a cada 6 horas envolvendo, portanto as três estações de injeção.

a - Integração de $Vz(t)$ nas estações de injeção:

Esta integração contém o erro devido à malha de pressão constante do vaso de injeção e a conseqüente contabilização indevida do peso de nitrogênio como se fosse peso de carvão. As vazões das três estações de injeção são integradas de modo simplificado utilizando a Expressão (6.11) a seguir de modo discreto:

$$Q_1 = \int_0^{6h} Vz(t)dt \quad (6.11)$$

Onde:

Q_1 : Integração da vazão de carvão obtida pelo sistema de pesagem (células de carga);

$Vz(t)$: Vazão de carvão instantânea calculada pelo SDCD e usada no controle principal.

b - Algoritmo de Integração com o vaso despressurizado:

Para a obtenção da vazão real de carvão injetado, Q_2 , é necessário eliminar a interferência do nitrogênio e do carregamento do vaso oposto. Assim, a Integral da soma das derivadas (6.12) expressa o real valor de carvão injetado acumulado para o alto-forno injetado pela estação de injeção:

$$Q_2 = \int_0^{6h} \left(\frac{dW_C}{dt} - \frac{dW_N}{dt} - \frac{dW_{CO}}{dt} \right) dt \quad (6.12)$$

Onde:

Q_2 : Vazão de carvão obtida pelo algoritmo de pesagem e vazão por bateladas de carregamento do vaso.

Em (6.12), se $\frac{dW_N}{dt} = 0$ e $\frac{dW_{CO}}{dt} = 0$, Q_2 seria o valor real de carvão procurado que não possui os 2,5% de erro a mais na quantidade injetada. Na realidade, o sistema está injetando 2,5% a menos do que as integrações atuais de $Vz(t)$, o que altera o "Fuel Rate" do alto-forno em + 0,6% no mínimo, pois normalmente o carvão pulverizado corresponde de 1/4 a 1/3 deste.

Para eliminação da interferência do nitrogênio e do carregamento do vaso oposto no sistema de pesagem e para maior precisão da quantidade acumulado a de carvão injetado é necessário realizar uma integração em longo prazo para o carvão injetado e carvão carregado. O algoritmo para medição do carvão carregado nos vaso por bateladas é descrito a seguir em 10 passos:

- 1 - A cada 24 horas zerar o valor de Q_2 inicial;
- 2 - Fechar a válvula de alívio 1 e coletar o peso do vaso 1 após carregamento (W_{ci0});
- 3 - Abrir a válvula de alívio 1 e coletar o peso do vaso 1 após a despressurização do vaso (W_{cf0});
- 4 - Calcular a diferença entre os pesos injetados ($\Delta W1 = W_{ci0} - W_{cf0}$);
- 5 - Fechar a válvula de alívio 2 e coletar o peso do vaso 2 após o carregamento (W_{ci0});
- 6 - Abrir a válvula de alívio 1 e coletar o peso do vaso 1 após a fase de alívio (W_{cf0});
- 7 - Calcular a diferença entre os pesos injetados ($\Delta W2 = W_{ci0} - W_{cf0}$);
- 8 - Fazer $Q_2 = Q_{2inicial} + \Delta W1 + \Delta W2$;

9 - Zerar as variáveis ΔW_1 e ΔW_2 ;

10 - No final de 24 horas atualizar os valores da memória FILO entre $Q_2(t-72)$, $Q_2(t-48)$, $Q_2(t-24)$ e $Q_2(t)$.

A principal desvantagem do algoritmo é que não pode ser usado para controle em tempo real, visto que o resultado da integração em bateladas é obtido a cada 20 min, ou seja, após a fase de carregamento, o que impede o controle de modo contínuo da vazão pela válvula dosadora.

6.5 INTERPRETAÇÕES DOS RESULTADOS OBTIDOS

Basicamente efetua-se a comparação entre os valores de Q_1 com Q_2 e calcula-se o erro percentual. Através da comparação dos valores totais de integração de cada estação verifica-se que erro percentual calculado fica próximo ao erro percentual medido comprovando o que acontece com as variáveis físicas e de processo do vaso de injeção durante a fase de injeção.

As Figuras 6.4 e 6.5 a seguir fornecem a base de dados obtidos pelo SDCD para comprovar as hipóteses de substituição do volume de carvão injetado pelo volume de nitrogênio, que foram descobertos e verificados nesta tese.

Note que para efeitos de comparação das quantidades injetadas com as quantidades carregadas, o temporizador e período de integração das Figuras 6.4 e 6.5 são os mesmos para as duas integrações Q_1 e Q_2 respectivamente.

A Figura 6.4 ilustra a matriz com os resultados de integrações da vazão de carvão, Q_1 , realizadas a cada dia durante três dias para cada estação de injeção sem fator de correção para o erro da medição de vazão ($k=1,000$).

INTEGRAÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO USADA NO CONTROLE - Q1					
TEMPO DE INTEGRAÇÃO		TEMPO DECORRIDO			
86400 S		9998 S			
INJEÇÃO	ATUAL	- 1 DIA	- 2 DIAS	- 3 DIAS	TOTAL 1
ALTO-FORNO 2	56,43 t	486,18 t	485,97 t	485,97 t	1277,95 t
ALTO-FORNO 3.1	67,02 t	606,53 t	581,55 t	581,55 t	1852,46 t
ALTO-FORNO 3.2	66,85 t	606,58 t	581,51 t	581,51 t	1852,23 t

Figura 6.4 - Integração dos valores injetados (k=1,000)

A Figura 6.5 ilustra a matriz com os resultados de integrações da vazão de carvão realizadas por bateladas durante o carregamento dos vasos de acordo com o algoritmo de geração de Q_2 durante três dias para cada estação de injeção.

INTEGRAÇÃO DO CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO - Q2					
TEMPO DE INTEGRAÇÃO		TEMPO DECORRIDO			
86400 S		9995 S			
INJEÇÃO	ATUAL	- 1 DIA	- 2 DIAS	- 3 DIAS	TOTAL 2
ALTO-FORNO 2	55,98 t	495,33 t	495,99 t	259,28 t	1306,58 t
ALTO-FORNO 3.1	68,25 t	618,59 t	595,86 t	617,58 t	1900,28 t
ALTO-FORNO 3.2	78,92 t	617,57 t	603,81 t	626,22 t	1926,51 t

Figura 6.5 - Integração dos valores carregados no vaso

As estações de injeção do Alto-forno 3 são complementares alimentando as lanças ímpares (Estação AF3.1) e as lanças pares (Estação AF3.2) na mesma quantidade. Trata-se de duas estações de injeção simétricas e similares que somadas proporcionam a vazão total de carvão pulverizado para o Alto-forno 3. É uma excelente base de comparação, haja vista que mesmo similares os equipamentos das estações são distintos, e os valores integrados em longo prazo tem diferenças menores que 0,1%, tal como ilustra a Tabela 6.1 a seguir:

Tabela 6.1 - Resultado comparativo das integrações realizadas					
Medição	Integração	\int	Estação AF2	Estação AF3.1	Estação AF3.2
Células de carga	Vz(t)	Q_1	1277,95 t	1852,46 t	1852,46 t
Algoritmo de carregamento	$Q_2 = \Delta W1 + \Delta W2$	Q_2	1306,58 t	1900,28 t	1926,51 t
Erro percentual aproximado			(-2,5)%	(-2,0)%	(-3,0%)

A Tabela 6.1 ilustra os resultados típicos dos dois tipos de integrações periódicas realizadas a cada 24 horas para cada estação de injeção obtido das Figuras 6.4 e 6.5. Eles são armazenados em memórias correspondentes aos últimos 3 dias na CSN e mostrados na tela gráfica da estação de operação. Os valores são então lançados pelo operador em uma planilha para comparação com o resultado das entradas de carvão e o que realmente foi injetado no alto-fornos para efetuar o balanço de massa final do PCI.

6.6 CORREÇÃO PARA ELIMINAÇÃO DO ERRO DE MEDIÇÃO

O valor de correção obtido pela análise dos dados (aproximadamente + 2,5%) foi aplicado na Equação (6.1) interna do SDCD sendo finalmente modificada para a Equação (6.13) como resultado desta tese:

$$F(t) = \frac{615 \times \{w(t-6) - w(t)\}}{\Delta t} \quad (6.13)$$

Onde, a quantidade 600 foi simplesmente alterada para 615, ou seja, +2,5%, visando a correção da vazão de carvão pelos cálculos de carga.

Os resultados das integrações de Q_1 e Q_2 com o novo fator de correção ($k=0,975$), ou seja, com a quantidade de 615 no lugar de 600 são ilustrados nas Figuras 6.6 e 6.7 respectivamente:

INTEGRAÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO USADA NO CONTROLE - Q1					
TEMPO DE INTEGRAÇÃO		TEMPO DECORRIDO			
86400 S		11481 S			
INJEÇÃO	ATUAL	- 1 DIA	- 2 DIAS	- 3 DIAS	TOTAL 1
ALTO-FORNO 2	65,44 t	517,80 t	499,65 t	499,65 t	1597,03 t
ALTO-FORNO 3.1	64,50 t	515,34 t	509,33 t	509,33 t	1594,98 t
ALTO-FORNO 3.2	64,47 t	515,33 t	509,43 t	509,43 t	1595,03 t

Figura 6.6 - Integração dos valores injetados ($k=0,975$)

INTEGRAÇÃO DO CARREGAMENTO DOS VASOS DE INJEÇÃO - Q2					
TEMPO DE INTEGRAÇÃO		TEMPO DECORRIDO			
86400 S		11479 S			
INJEÇÃO	ATUAL	- 1 DIA	- 2 DIAS	- 3 DIAS	TOTAL 2
ALTO-FORNO 2	67,67 t	508,59 t	501,08 t	512,59 t	1589,92 t
ALTO-FORNO 3.1	66,98 t	511,29 t	512,27 t	503,34 t	1593,87 t
ALTO-FORNO 3.2	55,72 t	525,94 t	526,61 t	489,19 t	1597,46 t

Figura 6.7 - Integração dos valores carregados

A Tabela 6.2 a seguir ilustra um quadro comparativo entre a técnica de medição de vazão de carvão e o algoritmo de vazão por bateladas de carregamento desenvolvido nesta tese para comprovação do erro de medição de vazão de carvão provocado pela substituição pelo nitrogênio:

Medição	Vantagens	Desvantagens
Células de carga: Vz(t)	<ul style="list-style-type: none"> - O sistema de pesagem já é incorporado na instrumentação básica da planta; - Sistema convencional e de uso consagrado. 	<ul style="list-style-type: none"> - Sofre interferência da malha de controle de pressão constante do vaso, vazamentos nas válvulas prato e alívio e carregamento do vaso oposto; - Demanda filtro de software para correção e formulação da média móvel; - Precisa de calibração com pesos padrões.
Algoritmo de vazão por bateladas: ΔW	<ul style="list-style-type: none"> - Alta precisão para quantidade de carvão injetado em longo prazo; - Permite contabilizar o que foi considerado erroneamente como carvão devido perdido com o acréscimo de nitrogênio. 	<ul style="list-style-type: none"> - Não é calculado em tempo real e, portanto não pode ser usado no controle dinâmico da vazão de carvão da válvula dosadora;

6.7 CONCLUSÕES

A Tabela 6.3 ilustra a diferença entre as integrações Q_1 e Q_2 antes ($k=1,000$) e após a correção com o fator de $k=0,975$:

Fator k	Equação 6.1	Erro AF2	Erro AF2	Erro AF2
1.000	600	- 2,9 %	- 3,2 %	- 3,8%
0.975	615	- 0,2 %	- 0,5 %	- 1,1 %

Os processos nos alto-forno ou ainda nas termoelétricas a carvão por questões energéticas e ambientais agora requerem desvios da vazão de carvão da ordem de **2,5%** em relação ao valor de referência (“set-point”).

Os valores integrados comprovam a existência da contabilização incorreta do peso de nitrogênio como se fosse carvão injetado. A grande vantagem da tese foi calcular de modo correto as quantidades de carvão injetadas nos altos-fornos.

Após a modificação deste fator no cálculo da vazão, de 600 para 615, a diferença entre a integral da vazão e o resultado do algoritmo de contabilização do carvão carregado nos vasos foi minimizada da ordem de + 2 a 3% para $\pm 0,5\%$.

Este trabalho é descrito no artigo [63] e é uma das principais contribuições aos modelos dinâmicos do transporte pneumático e da estação de injeção de carvão realizados em tempo real no SDGD.

Capítulo 7

Sistema de Medição da Vazão de Carvão Pulverizado

7.1 OBJETIVOS DA MEDIÇÃO DE VAZÃO DE CARVÃO ALTERNATIVA

A escolha do sistema de medição de vazão de carvão, que deverá ser instalado em áreas ambientalmente agressiva, não é simples de ser definida. Existem no mercado diversos sistemas de medição aplicados em outras siderúrgicas que foram analisados e estudados. Atualmente não existem medidores que atendam plenamente aos requisitos de controle da vazão de carvão necessários pelo processo de injeção em altos-fornos com precisão, custo baixo, robustez, confiabilidade e durabilidade, mesmo com os desenvolvimentos de [64] e Motta [65].

Conforme Yan [6], existem diversos princípios de medição. Dentre eles, existem os de atuação capacitiva de menor custo de manutenção, melhor aplicação em métodos por inferência fornecendo mais variáveis para o processo, além de atualmente no mercado serem os mais modernos, porém com pequena vida útil em função do local de instalação e de partes mecânicas envolvidas. Assim sendo, a disponibilidade do equipamento para a produção era reduzida, o método de calibração inexistente e seu uso discutível.

Por estas razões verificou-se da busca de um equipamento mais adequado, porém não disponível no mercado. Apresenta-se a seguir o desenvolvimento do dispositivo para atender a medição de vazão robusta, confiável, precisa e de custo com retorno de investimento inferior a 14 meses, o que fica bastante inferior a taxa de retorno de investimento aplicado em sistemas industriais que é de no mínimo 24 meses. Acima de 24 meses os investimentos não são feitos.

7.2 MÉTODOS DE DETERMINAÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO PULVERIZADO EM SISTEMAS DE INJEÇÃO

Existem basicamente dois métodos para se determinar a vazão de sólidos em um sistema de transporte pneumático de carvão pulverizado.

Quanto mais rápidos forem os métodos de medição melhor será a resposta dinâmica do processo aumentando a precisão (por exemplo, de 3 para 1%) e diminuindo a variabilidade da vazão de carvão pulverizado.

a - Medição através do peso do vaso de injeção.

A vazão de carvão é medida de forma indireta baseada na diferença de peso do vaso de injeção que está apoiado em três células de carga durante a fase de injeção em intervalos constantes fornecendo valores absolutos em kg/s.

Este método é usado na medição geral de vazão de um vaso seja ele individual ou com varias derivações distribuidor em sua base, como se fosse um distribuidor estático ou dinâmico no cone base do vaso de injeção.

O sistema de pesagem necessita de um sistema auxiliar composto de unidades hidráulicas e pesos padrões para calibrações periódicas durante a parada do processo de tal modo a garantir a calibração e a precisão da medição da vazão de carvão pulverizado. As células de carga têm que estar equilibradas e devidamente apoiadas de modo a fornecer um sinal de tensão proporcional ao peso de forma equilibrada.

b - Medição através de vazão de sólidos

A medição através da vazão de sólidos utiliza o método de inferência para determinação direta da vazão de carvão na linha de transporte principal fornecendo um sinal de instrumentação padrão, normalmente de 4 a 20 mA. Sua principal vantagem em relação ao método anterior é o menor tempo de resposta.

7.3 SISTEMAS DE MEDICÃO DE VAZÃO DE SÓLIDOS ATUAIS

Para medir concentração de sólidos, $D_s(t)$, um sensor capacitivo faz uma relação entre as diferenças no dielétrico da tubulação cheia com partículas sólidas e a tubulação vazia. A variação deste determina o grau de intensidade da concentração de carvão transportado.

A velocidade das partículas de carvão no transporte pneumático, $V_s(t)$, é determinada pelo método de correlação, ou seja, a velocidade em função do tempo que a partícula percorre a distância entre os sensores. A vazão da massa de carvão na linha principal com área da seção reta transversal da tubulação principal, A , com diâmetro de 83 mm, $M_s(t)$, é determinada na unidade de avaliação que faz a relação das variáveis medidas e determina a vazão de acordo com a Equação (7.1):

$$M_s(t) = A V_s(t) D_s(t) \quad (7.1)$$

A Figura 7.1 ilustra o tubo sensor desenvolvido e orientado em [66] que foi instalado na linha principal do transporte pneumático do carvão entre o vaso de injeção e o distribuidor.



Figura 7.1 - Tubo sensor instalado na linha de injeção

As medições de $V_s(t)$ e $D_s(t)$ para determinar a velocidade das partículas e da concentração volumétrica na tubulação são úteis para validar os modelos dinâmicos do processo além de controlar a vazão de carvão.

O sistema de medição desenvolvido fornece três saídas analógicas de medição em faixas de medição compatíveis com o processo, a saber:

a - $V_s(t)$ = Velocidade da partícula com faixa de medição: 0 a 20 m/s;

b - $D_s(t)$ = Densidade de fluxo com faixa de medição: 0 a 500 kg/m³;

c - $M_s(t)$ = Vazão de carvão com faixa de medição: 0 a 60 t/h.

7.4 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE VAZÃO

O sistema de medição de vazão de carvão desenvolvido foi encomendado para ser fabricado pela empresa alemã SWR [21]. A Figura 7.2 ilustra o diagrama do sistema de medição com as unidades de avaliação dos sensores e auto-calibração.

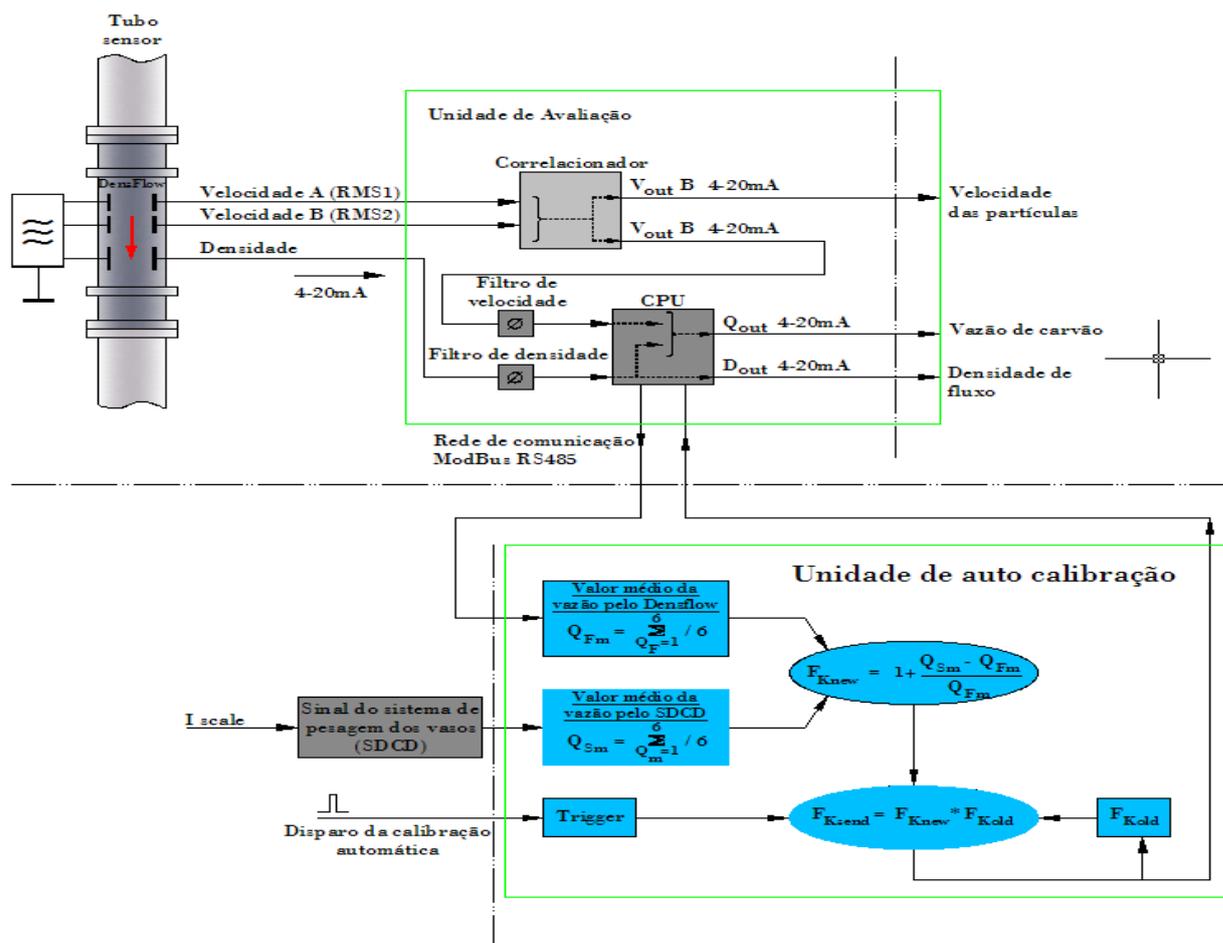


Figura 7.2 - Diagrama em blocos do sistema de medição desenvolvido

Na Figura 7.2 tem-se:

- Filtro de densidade: É um filtro de média móvel com um tempo base que pode ser selecionado entre 1 a 102 s. A cada 0,3 s uma amostra vai para uma memória do tipo FILO que faz a média. A cada 1 s a média é calculada e colocada no display e na saída analógica.

- Unidade de auto-calibração: coleta dados da unidade de avaliação via protocolo de comunicação serial, a vazão de carvão atual a cada 10 s. No mesmo instante, a entrada analógica da unidade de calibração lê o valor da vazão de carvão proveniente do SDCCD cuja fonte de dados é o sistema de pesagem baseado em células de carga;
- Fkend: É um algoritmo para o cálculo do fator de correção realizado a todo instante. Quando a unidade de calibração recebe o sinal de comando (disparo ou trigger) vindo do SDCCD, um novo fator de correção é calculado e enviado a unidade de avaliação sendo armazenado novamente na unidade de autocalibração. Os cálculos são realizados novamente, o que demanda mais um minuto para recarregar a memória FILO. Neste intervalo de tempo, nenhum sinal de disparo pode ser emitido pelo SDCCD, até que a memória FILO seja renovada. A Figura 7.3 ilustra o fluxograma de funcionamento.

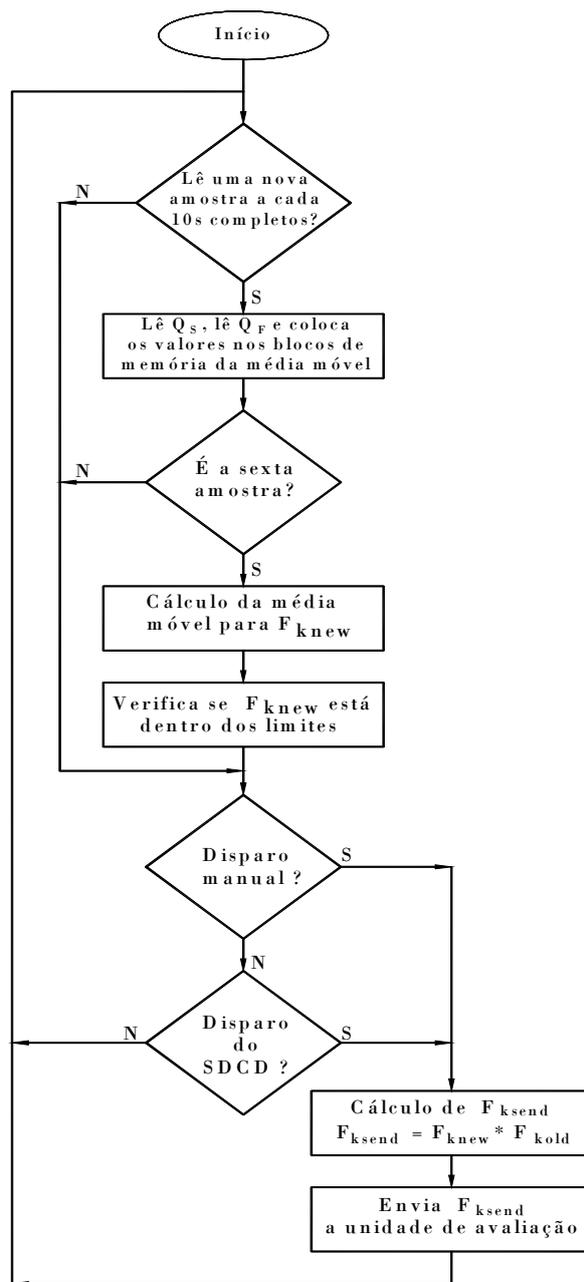


Figura 7.3 - Fluxograma de funcionamento do cálculo do fator de correção

A Figura 7.4 ilustra o diagrama de interligação entre o SDCD e a unidade de auto-calibração e avaliação desenvolvidas e implementadas nas três estações de injeção do PCI da CSN permitindo a análise dos modelos dinâmicos por meio destas novas variáveis de processo medidas e aumento no desempenho do transporte pneumático em geral devido a redução de N_2 para a mesma vazão de carvão.

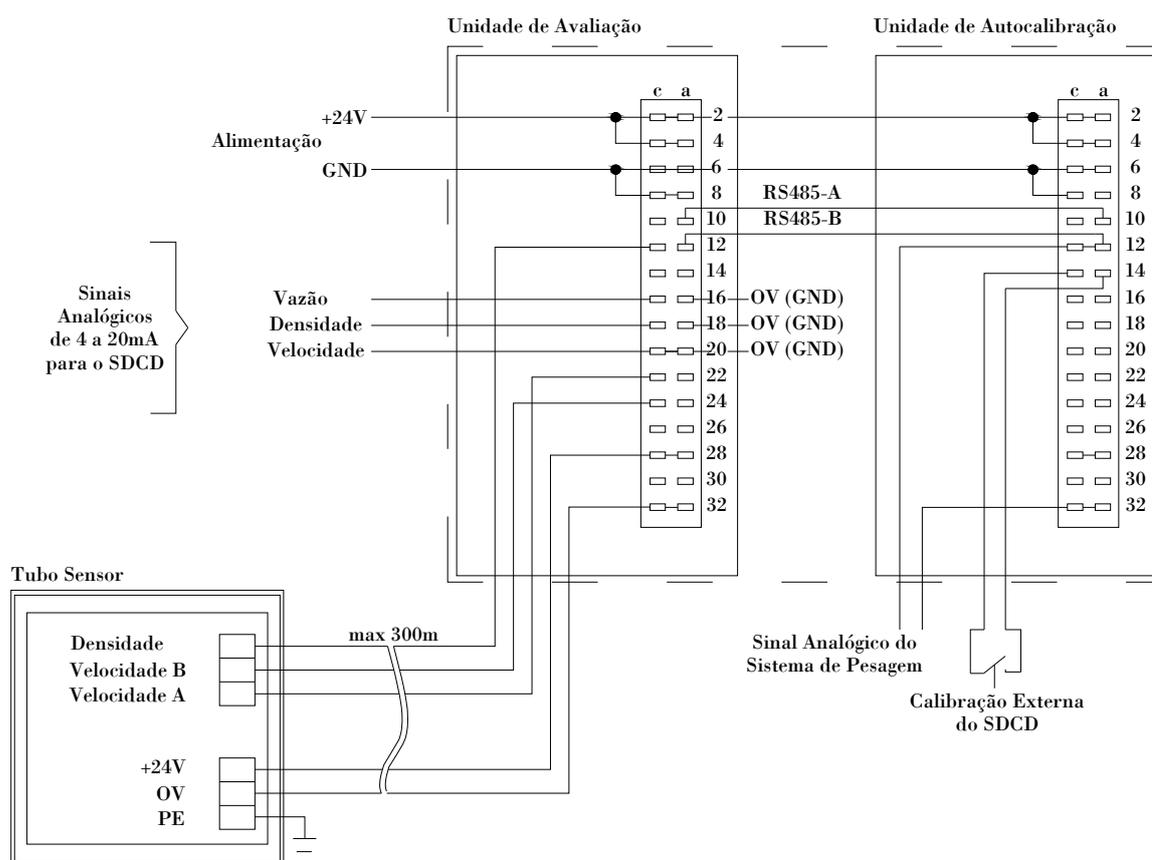


Figura 7.4 - Equipamento desenvolvido e suas conexões elétricas

Desse modo, a unidade de auto-calibração (Figura 7.4) fará que o sinal de vazão do instrumento seja igual ao sinal de vazão das células de carga somente se o vaso estiver estável, ou seja, sem vazamento de nitrogênio pelas válvulas prato ou alívio dentre outras condições como descrito no item a seguir.

Esta calibração só pode ser feita quando o SDCD detectar que o sistema de injeção está estável. Neste instante, o SDCD envia um sinal de disparo para o instrumento aceitar a calibração externa que por sua vez altera o fator de correção da densidade de fluxo automaticamente obtendo então um novo fator de calibração que dependerá da densidade, umidade e outras características físico-químicas variáveis de acordo com a natureza dos carvões moídos.

É importante para uma boa fluxabilidade do TP que a umidade do carvão seja menor que 2% segundo as literaturas [74]. O artigo [80] descreve um método de controle da umidade do carvão pulverizado através da adição controlada de ar da atmosfera no fluxo de gases das moagens com a finalidade de diminuir a recirculação de vapor d' água.

7.5 ALGORITMO DE AUTOCALIBRAÇÃO DESENVOLVIDO

O sinal de vazão de carvão do instrumento desenvolvido é calibrado em tempo real seguindo um algoritmo lógico de auto-calibração realizado pelo SDCCD apenas se as quatro condições a seguir forem atendidas:

- O vaso está na fase de injeção;

E

- Primeira auto-calibração da fase de injeção atual;

E

- Peso do vaso menor que 8 t;

E

- Desvio do controlador de vazão principal menor que $\pm 5\%$ por mais que 1 minuto.

A auto-calibração fornece um novo fator de correção para a medição de densidade fazendo com que o produto da Área x densidade x velocidade (na Equação 7.1) corresponda naquele instante a vazão de carvão medida pela célula de carga ou seja, de acordo com a Igualdade (7.2):

$$Ms(t) = Vz(t) \tag{7.2}$$

Para que isto aconteça, a unidade de auto-calibração ajusta o valor de $Ds(t)$ automaticamente de acordo com o sinal de gatilho programado no SDCCD.

7.6 GERAÇÃO DO SINAL DE FALHA DE FLUXO DE CARVÃO

O sinal de falha de fluxo de carvão na linha de transporte pneumática principal é usada para a desabilitação temporária da purga automática das lanças de injeção, pois caso contrário, as lanças vão para purga automática desnecessariamente, tal como descrito no Capítulo 5.

Os detectores de fluxo de carvão respondem a falha de fluxo de carvão colocando a linha em purga para desobstrução do entupimento. A válvula de carvão é fechada e de nitrogênio aberta. Esta ação é conhecida como purga automática que tem por função tentar desobstruir a lança de injeção.

Porém, os detectores de fluxo de carvão além de detectar os sólidos de carvão aglutinados na tubulação sem fluxo (lança entupida) infelizmente também detectou a passagem de somente nitrogênio o que ocorre durante a falha de fluxo de carvão advinda, por exemplo, devido a um alto vazamento de nitrogênio no vaso.

Assim, quando havia uma falha de fluxo de carvão na linha principal usualmente durante a troca de casos e principalmente agravada na intensidade e na ocorrência quando há vazamentos nas válvulas de alívio e prato.

A Figura 7.5 a seguir ilustra três gráficos que mostram como o sinal de falha de fluxo de carvão na linha principal é gerado para desabilitação temporária dos detectores de fluxo de carvão localizados no distribuidor após a válvula de carvão.

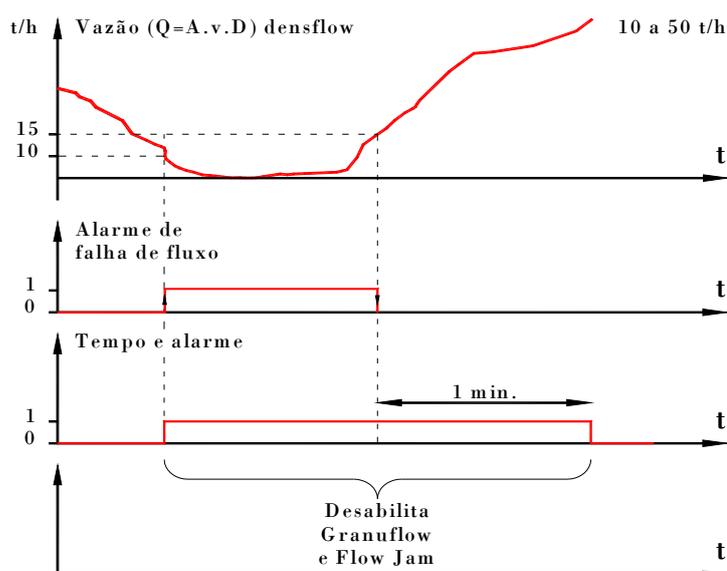


Figura 7.5 - Sinal de falha de fluxo de carvão

O primeiro gráfico ilustra a simulação de uma queda na vazão de carvão obtida pelo Densflow, novo sistema de medição de vazão de carvão pulverizado, implantado nesta tese.

Devido ao filtro de corte a ser visto no capítulo 10, o sinal de vazão das células de carvão não pode ser usado para esta finalidade.

Quando o valor de vazão é menor que 10 t/h, o alarme é gerado. Quando o sinal é maior que 15 t/h, o alarme de falha de fluxo de vazão é normalizado e uma temporização de 1 minuto é inicializado, tal como ilustra o segundo gráfico.

Finalmente, o último gráfico na Figura 7.5 representa o sinal de falha de fluxo de carvão sendo a combinação lógica ou entre o sinal de alarme e a temporização de 1 minuto. Este tempo é necessário para que a linha principal de carvão encha novamente e os detectores de carvão após as válvulas do distribuidor não atuem desnecessariamente ocasionando uma queda de injeção por número mínimo de lanças de injeção.

7.7 RESULTADOS DOS SINAIS OBTIDOS COM O DENSFLOW

A partir do medidor instalado na linha de injeção do Alto-forno 3 pôde-se realizar um comparativo entre as duas formas agora existente de medição para a vazão dos finos de carvão na linha principal do transporte pneumático.

A Figura 7.6 ilustra os gráficos de tendência desenvolvidos para monitorar as variáveis do instrumento desenvolvido.

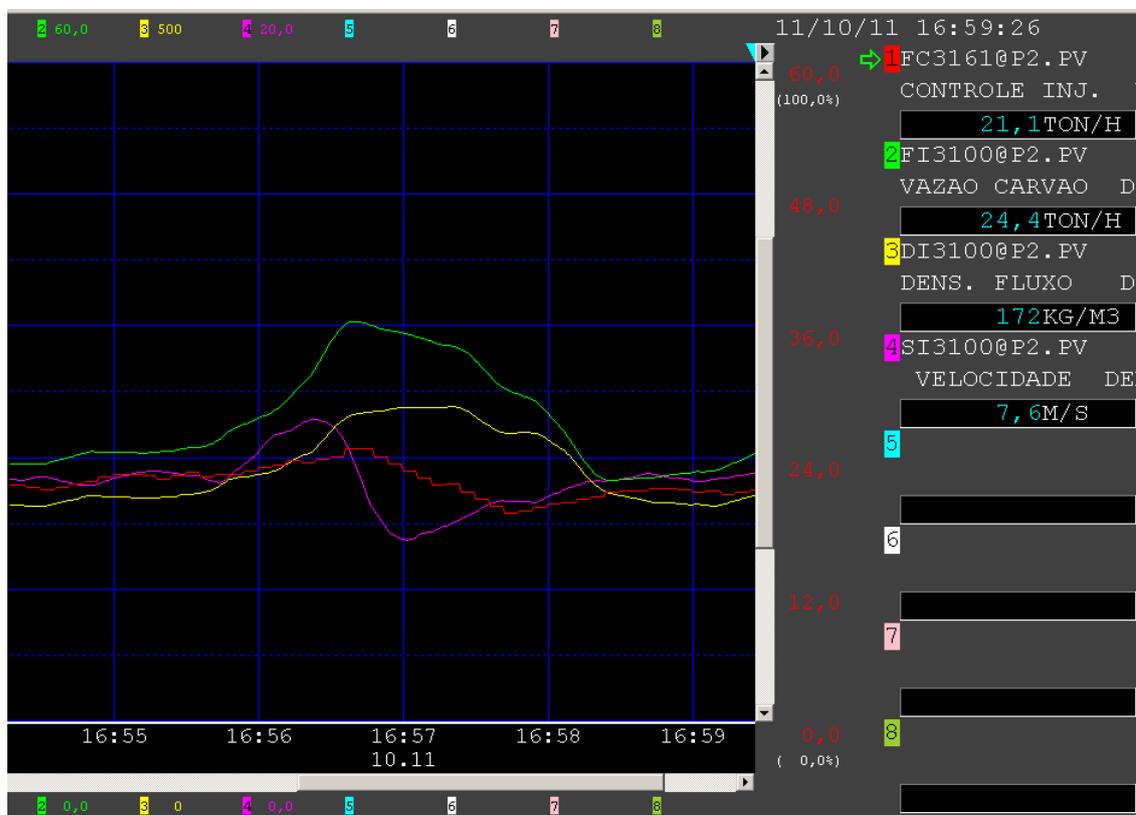


Figura 7.6 - "Off-set" entre as medições de vazão de carvão

Nota-se o acompanhamento dos sinais de vazão medido pelas células de carga em vermelho e o sinal de vazão de carvão medido pelo Densflow em verde com um pequeno “off-set” a ser zerado pela unidade de auto-calibração. A Figura 7.7 ilustra o momento em que a auto-calibração é ativada na rota impar do AF3.

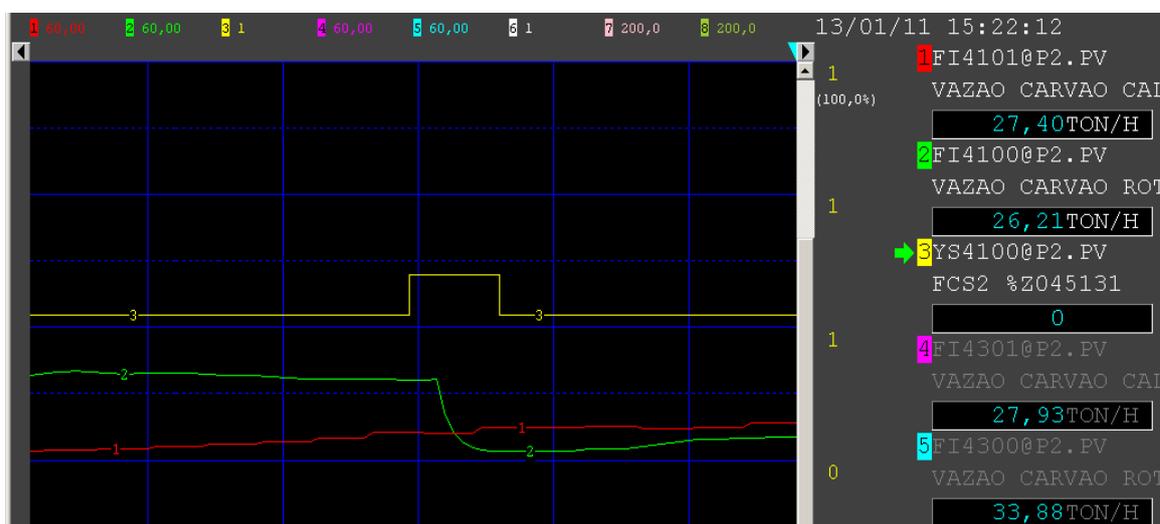


Figura 7.7 - Tela típica da auto-calibração do AF3.1 visualizada pelo operador

A Tabela 7.1 ilustra a comparação entre a medição da vazão de carvão por sistema de pesagem baseado em células de carga e as medições realizadas pelo equipamento “Densflow”.

Tabela 7.1 - Comparação entre a medição de vazão de carvão por célula de carga e Densflow		
Técnica de Medição da vazão de carvão	Vantagens	Desvantagens
Sistema de pesagem baseado em células de carga: Vz(t)	<ul style="list-style-type: none"> -O sistema de pesagem normalmente já vem incorporado no projeto de instrumentação básica da planta; -Sistema convencional de uso consagrado ao redor de todo o mundo (Estado da arte); -Sistema de alta precisão e repetibilidade. 	<ul style="list-style-type: none"> -Sofre interferência devido ao controle de pressão do vaso ou devido a vazamentos nas válvulas prato ou na válvula de alívio; -Requer filtro de software e media móvel para fornecer sinal estável de vazão de carvão; -Requer calibração com pesos padrão.
Medição por vazão mássica de carvão pulverizado Densflow: Ms(t)	<ul style="list-style-type: none"> - Não sofre interferências das variações de pressão no vaso, vazamentos e rigidez mecânica indevida; - Pode ser usado no controle da vazão de carvão principalmente em caso de reposição elevada de N₂ devido a vazamento crítico; - Fornece os sinais de velocidade e densidade de fluxo na linha principal usado para ajuste do transporte pneumático e verificação dos modelos dinâmicos. 	<ul style="list-style-type: none"> - Necessita de um segundo instrumento para calibração periódica; - Sofre uma pequena interferência devido a mudança nas características físico-químicas do carvão tais como umidade, densidade e granulometria.. - Equipamento sensível e necessita de um filtro de média móvel para ser posto em controle da vazão de carvão.

7.8 CONCLUSÕES SOBRE A NOVA MEDIÇÃO DE VAZÃO IMPLANTADA

O desenvolvimento do equipamento permitiu monitorar o sistema de medição de vazão por células de carga do PCI/CSN melhorando significativamente o processo de transporte pneumático de carvão pulverizado, utilizando a velocidade e a densidade de fluxo em tempo real. Além disto, o novo sistema de medição de vazão proporcionou uma estabilidade no processo bem como na relação da injeção de nitrogênio por carvão e maior eficiência energética com a diminuição do gasto de energia elétrica dos compressores e do nitrogênio específico na injeção.

Com o auxílio de um instrumento industrial dedicado e estudado neste trabalho, pode-se obter com exatidão a velocidade dos sólidos e com precisão a densidade dos sólidos quando bem calibrado. Com isto, pode-se validar na prática as relações das variáveis do transporte pneumático com a variação instantânea da vazão de carvão, obtendo uma maior relação sólido/gás, μ (kgCarvão/kgN₂). Isto proporciona um menor custo específico de nitrogênio e eletricidade para a mesma taxa de injeção de carvão sem afetar a variação. Isto nunca foi cogitado nem estudado por ninguém, após uma pesquisa em geral nos assuntos e temas relativos à injeção de carvão pulverizado - PCI e foi relatado no trabalho de Motta [67].

Uma das metas da tese foi desenvolver e instalar um novo medidor de vazão de carvão/sólidos especiais e inserir na lógica de controle como variáveis de processo no lugar daquela vazão obtida pelo decréscimo do vaso sobre determinadas circunstâncias. O controle pelo Densflow pode proporcionar um melhor controle e menor variação de injeção, visto que a medição de peso do vaso de injeção de carvão pulverizado sofre influência da variação de sua pressão. Quando o vaso é pressurizado seu peso aumenta ligeiramente, pois sofre as influências do peso do nitrogênio. Quando o vaso possui um vazamento elevado existe uma perda de nitrogênio que afeta a linearidade do decréscimo do peso do vaso que por sua vez afeta a média móvel e gera o descontrole da taxa de injeção, sendo um dos principais problemas na estabilidade da vazão de carvão.

Entretanto sua susceptibilidade, rápida resposta e sensibilidade a defeitos do transporte pneumático levam a uma variação ainda maior no controle e, portanto seu uso para controle primário (fonte primária de variável de processo para o controlador de vazão de carvão) foi descartado. Ele é usado como redundância do controle de vazão principal como será visto no Capítulo 10.

Capítulo 8

Modelagem do Transporte Pneumático da Estação de Carvão Pulverizado

8.1 OBJETIVOS DA MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Este item modela estaticamente o transporte pneumático das estações de injeção de carvão pulverizado nos altos-fornos da CSN. Esta modelagem é útil para se determinar os valores estáticos de pressão de injeção, vazão de nitrogênio de transporte e fluidização do cone base do vaso de injeção que possuem o maior desempenho para aquele determinado ponto de operação regido pelo valor de referência (“set-point”) demandado pelo alto-forno. Através deste modelo, as vazões do fluxo bifásico de carvão pulverizado e nitrogênio no processo são determinadas e como resultado, uma posição inicial predeterminada na fase de injeção para a válvula de controle de fluxo de carvão é obtida, e inserida em seu controle dinâmico.

O transporte do carvão pulverizado até o distribuidor é feito através de nitrogênio comprimido por uma tubulação com diâmetro externo de 3^{1/2}” (DN 100) e diâmetro interno de 83 mm. Para isto existem margens de valores de velocidades das partículas, para uma operação bem sucedida tal como descrito em [69], [70], [71] e [72] não afetando a uniformidade das chamas dos fornos. Estas são:

- Valor mínimo - inferior a 1 m/s

Conseqüências da operação em valores mínimos

- Entupimento na linha de TP ou lança de injeção;
- Proporciona maior tempo de queima da partícula.

- Valor máximo - superior a 5 m/s

Conseqüências da operação em valores máximos

- Desgaste da linha;
- Requer mais energia para transporte pneumático;
- Degradação da partícula de carvão; entre outros fatores.

A vazão e a velocidade de carvão pulverizado em cada ventaneira é um parâmetro crucial e influencia na realização do transporte pneumático e na eficiência da combustão. O essencial para um transporte favorável é a velocidade. Ela deve estar sempre mantida em torno de um valor mínimo de segurança, para se obter uniformidade nas chamas e assim eficiência energética. Quando o transporte possui uma velocidade excessiva, ele gera um alto consumo de eletricidade, desgaste da tubulação e degradação das partículas. Isto influencia na eficiência da queima, pois altera o poder calorífico do carvão tal como relatam [73] e [74]. No oposto, tem-se a velocidade reduzida esta causa segmentação das partículas na tubulação, chegando até um entupimento na lança de injeção, o que poderia causar uma explosão.

As vazões de nitrogênio e carvão pulverizado transportados pneumaticamente por tubulações são controladas por meio de lógica através do sistema SDCD e pela intervenção dos atuadores de processo (no caso, as válvulas de controle de vazão e pressão).

Uma vez efetuado o modelo matemático que descreve o comportamento da estação de injeção poderá se efetuar a análise do comportamento das quatro malhas de controle durante a fase de Injeção. A partir disto, pode-se avaliar o grau de acoplamento e interação entre as malhas de controles principais. Com isto, pode-se projetar uma nova estratégia de controle que leve em consideração o desacoplamento entre as malhas de controle de vazão e pressão.

8.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE CONTORNO DO MODELO

As condições de contorno iniciais para elaboração do modelo dinâmico do transporte pneumático efetuado pelo vaso de injeção, Figura (8.1), durante a fase de injeção são:

- a - Válvula prato e válvula de alívio não vazam;
- b - Não existe nenhum vazamento no vaso ou em sua tubulação de nitrogênio;
- c - Volume inicial de nitrogênio e a pressão do vaso são constantes ao longo de toda a fase de injeção;
- d - Válvula PCV possui a mesma curva característica e C_v que a FCV-1;
- e - Pressão do tanque de armazenagem de nitrogênio é constante (17 bar);
- f - Valor de “set-point” de vazão de carvão pedido pelo alto-forno é constante.

As condições a e b são semelhantes e pré-condição para a estabilidade do controle e do modelo para ensaios a respostas de mudanças em “set-points”. Estes “set-points” podem ser obtidos pelas das Equações a seguir que serão inseridas no modelo. Além disto, existe uma diferença entre a pressão de injeção e de transporte e a queda de pressão na linha, que é constante para uma vazão fixa.

As condições de contorno da modelagem e as variáveis descritas anteriormente não foram consideradas nos trabalhos de Birk [10] e Medvedev [11]. Além disto, não houve considerações sobre a vazão de transporte e sua influência na pressão diferencial do injetor. Tudo isso tornou necessário o desenvolvimento de um novo modelo em relação ao idealizado por Birk [12] para descrever o comportamento do vaso de injeção e poder definir os melhores algoritmos e estratégias de controle.

Como literatura de experiências práticas de nível industrial na redução da variabilidade de processos tem-se os trabalhos [38] a [41] e principalmente o [42] onde são descritas plantas industriais com múltiplas malhas de controle acopladas.

A Figura 8.1 a seguir ilustra o desenho esquemático novo do vaso de injeção atual da CSN, objeto de modelagem deste trabalho. A modelagem é feita durante a fase de injeção levando-se em consideração a queda de pressão da linha principal de injeção de 3^{1/2}” devido ao carvão e ao nitrogênio desde a saída do vaso até a lança de injeção de carvão. As perdas no distribuidor, D, são consideradas como se fosse mais uma curva de 90° no trajeto da linha principal.

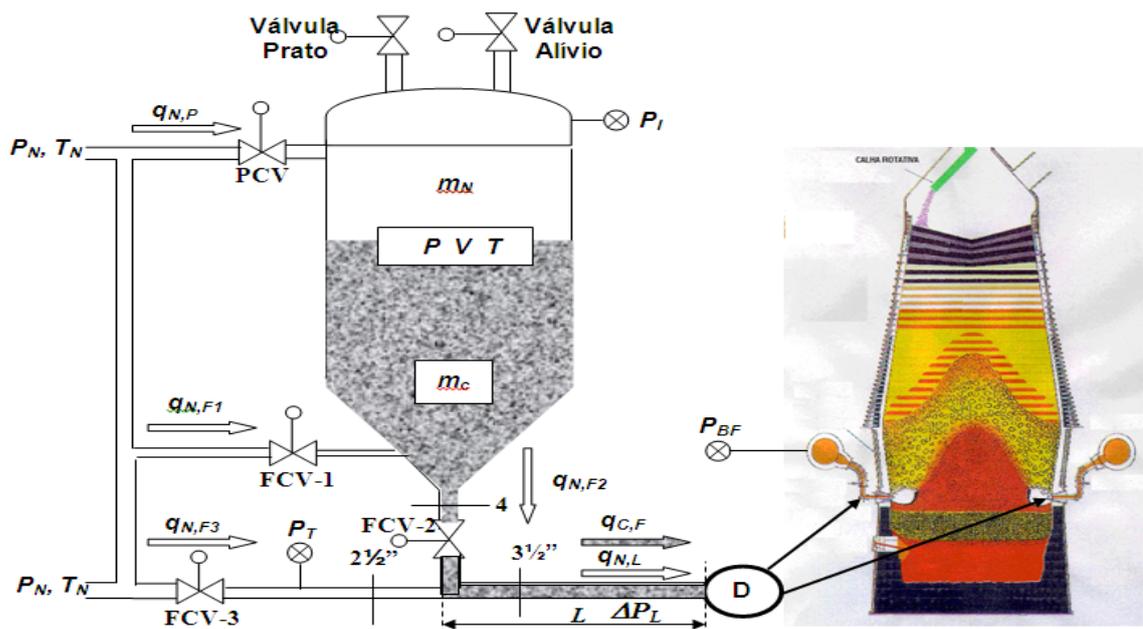


Figura 8.1 - Desenho esquemático do novo modelo do vaso de injeção

A Tabela 8.1 a seguir contém a nomenclatura usada na modelagem. Procurou-se preservar a mesma nomenclatura usada por Birk [12], acrescentando as novas variáveis obtidas com o desenvolvimento da modelagem e inclusão das vazões de transporte e fluidização. Além disto, houve o levantamento das curvas características das válvulas de controle, e da inclusão das variáveis e parâmetros do transporte pneumático.

Tabela 8.1 - Nomenclatura da modelagem do transporte pneumático da estação de carvão pulverizado		
Símbolo	Descrição	Detalhes
a	Área da restrição do Venturi	Área transversal mínima interna da válvula
L	Comprimento da linha principal	Comprimento desde o vaso até o alto-forno
D	Diâmetro interno da válvula dosadora 40 mm	Característica construtiva do fabricante
x	Variável manipulada normalizada de 0,0 a 1,0	Comando de posição para a válvula
ZI	Posição atual da válvula dosadora em %	Medição do transdutor de posição
y	Distância de penetração dos círculos	Curva característica da válvula dosadora
P _I	Pressão interna do vaso de injeção	"Set-point" em função da vazão de carvão
P _T	Pressão da linha principal de injeção	Pressão do transporte pneumático
P _N	Pressão de alimentação	Pressão da rede de nitrogênio = 17 bar
ΔP _L	Queda de pressão na linha principal	Perda de pressão durante a fase de injeção
P _D	Pressão na linha antes do Distribuidor	Pressão do distribuidor de carvão
P _{AF}	Pressão de sopro da base do Alto-forno	Pressão do Alto-forno 3 da CSN = 4,2 bar
F _{N,P}	Vazão de N ₂ através da PCV	Vazão volumétrica pela linha de pressão
F _{N,F}	Vazão de N ₂ através da FCV1	Vazão de N ₂ fluidização no cone do vaso
F _{N,C}	Vazão de N ₂ através da FCV2	Vazão de N ₂ pela válvula dosadora
F _{N,T}	Vazão de N ₂ através da FCV3	Vazão de N ₂ de transporte ou arraste
ΔP _{FCV2}	Perda de carga através da FCV2	Queda de pressão da válvula dosadora
F _{N,L}	Vazão de N ₂ através da linha de TP	Vazão total de N ₂ na linha principal de TP
q _{N,P}	Vazão mássica de N ₂ através da PCV	Volume inserido pelo controle de pressão
q _{N,F}	Vazão mássica de N ₂ através da FCV1	Volume inserido pela linha de fluidização
q _{N,C}	Vazão mássica de N ₂ através da FCV2	Volume de N ₂ que passa pela dosadora
q _{N,T}	Vazão mássica de N ₂ através da FCV3	Volume inserido no tubo injetor
q _{N,L}	Vazão mássica N ₂ pela linha principal	Vazão transporte + vazão de N ₂ Dosadora
q _{C,F}	Vazão mássica de Carvão pela FCV2	Taxa de injeção de carvão no Alto-forno
μ	Relação de kgCarvão/kgN ₂	Parâmetro do transporte pneumático
C	Velocidade das partículas de carvão	Parâmetro do transporte pneumático
ρ _{N2}	Densidade do Nitrogênio na CNTP	ρ _{N2} = 1,2527 kg/m ³
ρ _c	Densidade do Carvão Pulverizado	ρ _c = 550 a 650 kg/m ³ dependendo do carvão
ρ _F	Densidade da mistura bifásica na linha TP	Sempre ρ _F < ρ _c
T _F	Temperatura final da mistura bifásica	Temperatura média do TP = 70 a 80°C
T _C	Temperatura média dentro do filtro de mangas	Temperatura média do Carvão = 80 a 90°C
T _N	Temperatura do N ₂ de alimentação	Temperatura do N ₂ = 15 a 40°C
D _F	Densidade de fluxo bifásico na linha TP	Densidade de fluxo na linha principal
D _L	Densidade específica de linha	Densidade de linha na tubulação TP
M	Número de válvulas de carvão abertas	Número de aberturas após o distribuidor
Q _{1,NL}	Vazão mássica N ₂ após o distribuidor	Vazão de N ₂ total dividida por M
Q _{1,C,F}	Vazão de Carvão na linha após o distribuidor	Vazão de carvão na lança simples
Q _{2,NL}	Vazão mássica N ₂ após a bifurcação em Y	Vazão de N ₂ total dividida por 2M
Q _{2,C,F}	Vazão de Carvão na lança após a bifurcação Y	Vazão de carvão na lança dupla

8.3 DIAGRAMAS EM BLOCOS DOS MODELOS DINÂMICOS

O modelo do vaso de injeção nos fornecerá como variáveis de saídas principais do processo, a taxa de injeção calculada e a posição prevista da válvula dosadora para que a estação de injeção forneça naquelas mesmas condições, a vazão de carvão solicitada pelo alto-forno sem distúrbios na troca de vasos.

O modelo do transporte pneumático fornecerá os parâmetros do transporte pneumático que auxiliarão na melhora da eficiência energética do processo bem como sua influência na variabilidade. Além disto, será possível se obter a velocidade de escoamento das partículas de carvão para que o transporte pneumático não atinja a velocidade crítica mínima de entupimento das lanças de injeção de carvão nos algaravizes dos altos-fornos.

A Figura 8.2 a seguir ilustra o diagrama geral em blocos dos dois principais modelos a serem desenvolvidos tendo como base as variáveis da Tabela 8.1. As variáveis de entrada são obtidas pela taxa de injeção pedida pelo operador do AF:

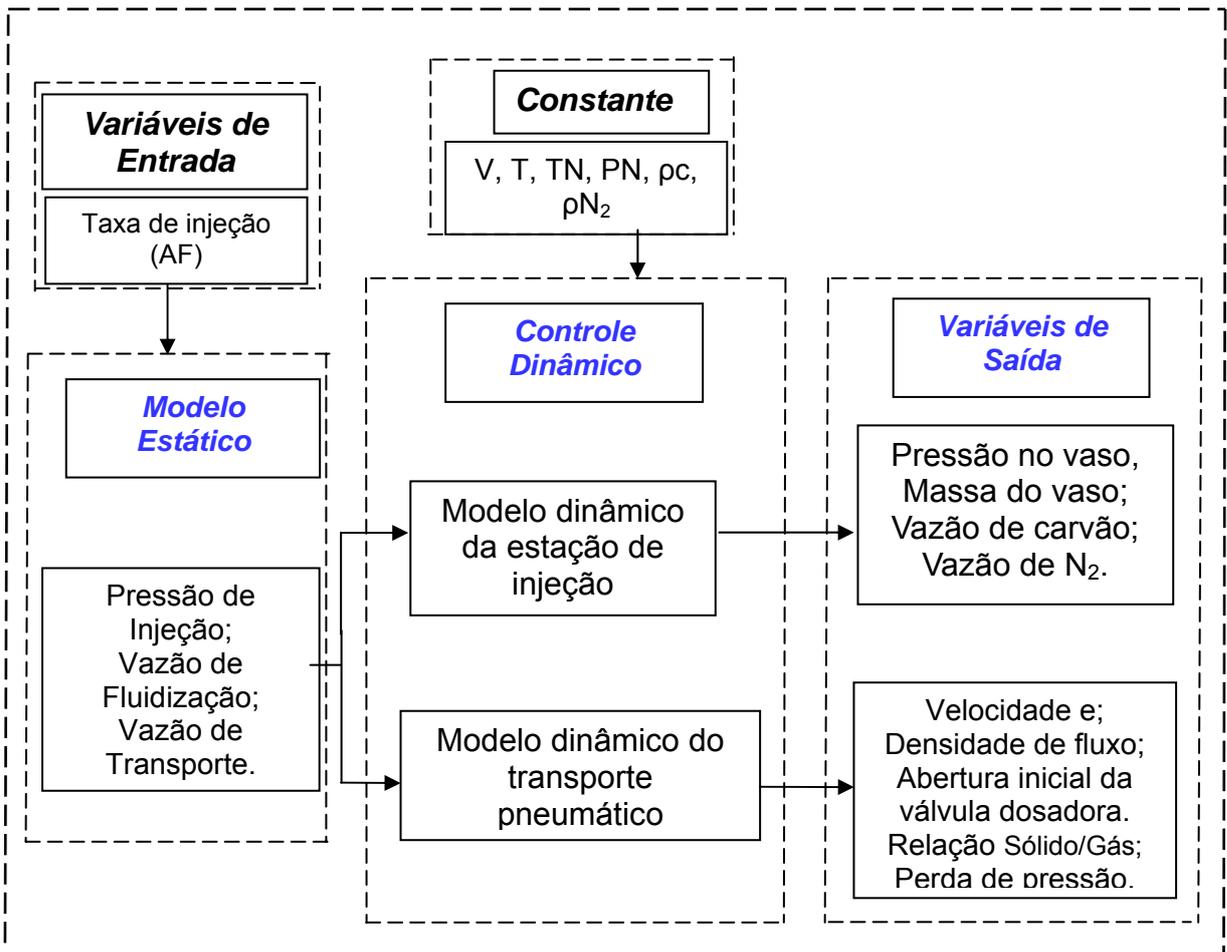


Figura 8.2 - Diagrama em blocos do modelo matemático para o transporte pneumático do PCI

As três malhas auxiliares do vaso possuem influências fortes e fracas sobre a malha principal, ou, malha de controle de vazão de carvão. A pressão de injeção possui influência direta sobre a capacidade máxima de injeção, haja vista seu gráfico de “set-point” que aumenta com o pedido de vazão de carvão. Porém, a pressão de injeção é influenciada indiretamente pela vazão de fluidização. Vazões altas de fluidização contribuem para a fluidez do carvão pela dosadora, mas também contribuem para o aumento e descontrole da pressão interna do vaso.

O “set-point” de vazão de transporte ou arraste por sua vez diminui com o aumento da taxa de injeção para permitir um maior fluxo gás-sólido pela válvula dosadora. Assim, pode-se dizer que a vazão de transporte contribui para a pressão diferencial entre linha e vaso. Quanto maior for a pressão diferencial entre vaso e linha principal maior será a capacidade de injeção do vaso em t/h.

8.4 RELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS DE PROCESSO

As relações entre as variáveis de processo primário do transporte pneumático da estação de injeção de carvão pulverizado são descritas nos itens a seguir. Elas compõem a modelagem estática do transporte pneumático realizada pelo processo para se obter os valores de referência para as malhas de controle de acordo com a vazão de carvão demandada pelo alto-forno.

8.4.1 Pressão de injeção

A pressão de injeção é mantida num valor constante durante a fase de injeção controlada por um controlador tipo PI, visando-se a menor variabilidade possível na vazão de carvão. O valor de referência “set-point” do controle de pressão de injeção é determinado pela Equação (8.1) a seguir:

$$P_I = P_{\text{Min}} + \frac{P_{\text{Máx}} - P_{\text{Min}}}{C_{\text{Máx}} - C_{\text{Min}}} \times (C_{\text{REQU}} - C_{\text{Máx}}) \quad (8.1)$$

Onde:

P_{MAX} : Pressão máxima do vaso para 50 t/h = 13 bar;

P_{MIN} : Pressão mínima do vaso para 10 t/h = 9 bar;

C_{MAX} : Vazão máxima de injeção de carvão = 10 t/h;

C_{MIN} : Vazão mínima de injeção de carvão = 50 t/h;

C_{REQU} : Vazão de injeção de carvão solicitada pelo alto-forno t/h.

8.4.2 Vazão de nitrogênio de transporte ou vazão de arraste

O valor de referência “set-point” do controle da vazão transporte ou vazão de arraste é calculado pela Equação (8.2) a seguir:

$$F_{N,T} = V_{Min} + \frac{V_{Máx} - V_{Min}}{C_{Máx} - C_{Min}} \times (C_{Máx} - C_{REQU}) \quad (8.2)$$

Onde:

V_{MAX} : Vazão máxima de transporte do vaso para 10 t/h = 1400 m³/h na CNTP;

V_{MIN} : Vazão mínima de transporte do vaso para 50 t/h = 800 m³/h na CNTP.

8.4.3 Vazão de nitrogênio de fluidização

O “set-point” do controle de vazão de nitrogênio de fluidização injetada no cone base do vaso é definido pela Equação (8.3):

$$F_{N,F} = V_{Min} + \frac{V_{Máx} - V_{Min}}{C_{Máx} - C_{Min}} \times (C_{REQU} - C_{Máx}) \quad (8.3)$$

Onde:

V_{MAX} : Vazão máxima de fluidização do vaso para 50 t/h = 600 m³/h na CNTP;

V_{MIN} : Vazão mínima de fluidização do vaso para 10 t/h = 300 m³/h na CNTP.

8.5 CURVAS CARACTERÍSTICAS DAS VÁLVULAS DE CONTROLE

As curvas características das válvulas de controle comuns de vazão e pressão de nitrogênio foram levantadas e inseridas no modelo. Segundo diversos fabricantes de válvulas de controle [76] e [77], por exemplo, para uma válvula de controle qualquer, a área da seção transversal mínima de sua restrição é função de um sinal de entrada (saída do controlador), tal como a Equação (8.4) a seguir:

$$a = kg(u(t)) \quad (8.4)$$

Onde:

k: fator de multiplicação (fator escalar);

g(u(t)): curva característica da válvula.

A vazão através de uma válvula de controle depende do tamanho da válvula, da queda de pressão sobre a mesma, da posição da haste e das propriedades do fluido, tal como ilustra a Equação (8.5) a seguir:

$$F = C_v f(x) \sqrt{\frac{\Delta P}{\text{sp.gr.}}} \quad (8.5)$$

Onde:

F: Vazão pela válvula em m³/h nas CNTPs;

C_v: Coeficiente de vazão (função do tamanho da válvula);

x: posição da haste da válvula (fração da abertura total de 0 a 100%);

f_(x): Curva característica da válvula;

ΔP: queda de pressão sobre a válvula;

sp.gr.: gravidade específica m/s².

A curva característica da válvula **f(x)** representa a variação da área da seção transversal **a** em função da posição **x** pedida pelo posicionador que recebe o sinal do controlador do SDCCD, portanto, tem-se as Equações (8.6) e (8.7) a seguir [78]:

$$f(x) = a \quad (8.6)$$

$$u_c = x \quad (8.7)$$

O fabricante da válvula pode trocar o formato do obturador e da sede, e a válvula pode ser fabricada com diversos tipos de curvas características. As três curvas características mais comuns com suas respectivas Equações (8.8), (8.9) e (8.10) são mostradas a seguir:

$$a - \text{Linear} \Rightarrow f_{(x)} = x \quad (8.8)$$

$$b - \text{Raiz quadrada} \Rightarrow f_{(x)} = \sqrt{x} \quad (8.9)$$

$$c - \text{Igual Porcentagem} \Rightarrow f_{(x)} = \alpha^{x-1} \quad (8.10)$$

Os dados de placa das válvulas de controle de vazão de fluidização (FCV2), transporte (FCV3) e controle de pressão (PCV) do PCI foram levantados em campo e enviados ao fabricante Valtek [77]. Todas estas válvulas têm a curva característica de igual porcentagem com $\alpha=16$. O fabricante forneceu uma fórmula prática de vazão para suas válvulas, “Software” de especificação e simulações, bem com a curva característica de vazão para cada uma, conforme ilustra a Figura 8.3:

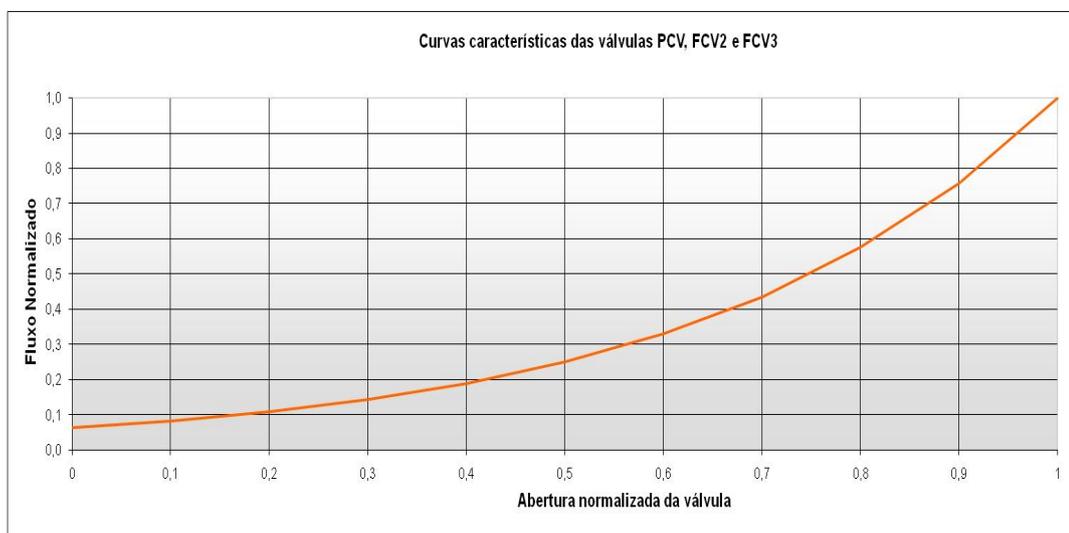


Figura 8.3 - Curva característica das válvulas de controle PCV, FCV2 e FCV3

A partir da curva característica de todas as válvulas podem-se obter as equações que exprimem as vazões normalizadas de nitrogênio pelas três válvulas em função dos “set-point” e das saídas (variáveis manipuladas) dos controladores PID. Porém, as curvas características das válvulas de controle vazão de nitrogênio, a princípio, não são importantes para a modelagem, uma vez que o set-point de vazão é sempre atendido.

O importante da modelagem das válvulas de controle é somente para o caso da válvula de controle de pressão, onde é interessante se conhecer a vazão de nitrogênio $F_{N,P}$ introduzida no vaso, através da linha de controle de pressão, bem como seu tempo de resposta dinâmica.

A válvula de controle de vazão (FCV1) e a válvula de controle de pressão (PCV) são iguais em dimensão (DN50) e iguais em capacidade de vazão (mesmo C_V). Elas também têm a mesma curva característica de igual percentagem (=%) de acordo com [72] e com o mesmo ($\alpha=16$). Portanto, a vazão de nitrogênio através da PCV, F' , pode ser estimada como na Equação (8.11) de acordo com [61]:

$$F' = C_V f(x) \sqrt{\Delta P} \quad (8.11)$$

Como visto no processo, Figura 8.1, as válvulas têm mesma curva característica, mesmas capacidades de vazão, C_V , e são aplicados no mesmo ΔP entre tanque de armazenagem e o vaso de injeção. Portanto, a Relação (8.12) exclusiva desta modelagem pode ser aplicada para se obter a vazão através da PCV de acordo com [58]:

$$\frac{F}{F'} = \frac{f(x)}{f(x')} = \frac{\alpha^{u-1}}{\alpha^{u'-1}} \quad (8.12)$$

Finalmente, a vazão $F_{N,P}$ é calculada de acordo com a Expressão (8.13):

$$F_{N,P} = F_{N,F} \frac{\alpha^{U_P-1}}{\alpha^{U_F-1}} \quad (8.13)$$

A quantidade de N_2 que entra no vaso através da PCV é definida pela Equação (8.14):

$$q_{N,P} = F_{N,P} \rho_{N_2} \quad (8.14)$$

8.6 CURVA CARACTERÍSTICA DA VÁLVULA DOSADORA

A válvula dosadora FCV2 ou válvula de controle de vazão de carvão é uma válvula especial de fabricação exclusiva da Claudius Peters. Ela e o vaso de injeção são os elementos fundamentais para a modelagem. Dentro de sua documentação, após consulta ao fabricante [4] e a experiência de [5], chega-se a conclusão que ela não possui uma curva característica de abertura percentual em função de sua posição definida. É necessário seu levantamento para modelagem completa do processo, objeto fundamental para alcançar os objetivos primários da tese.

O orifício interno de passagem dosador possui 40 mm de diâmetro. Assim, levantou-se a curva característica variando a distância d de 1 em 1 mm desde 0 até 40 mm, obtendo com o auxílio de integração gráfica (AutoCAD) a área comum de intercessão entre os círculos.

Os estudos de superposição dos círculos representativos deste orifício com a placa de tungstênio de dosagem de 40 mm de diâmetro em função da distância de penetração da placa de controle no orifício da tubulação do injetor para representar a curva característica da válvula dosadora.

A Figura 8.4 ilustra a simulação efetuada no avanço da válvula dosadora (em mm) e sua correspondente área de abertura conjunta entre a passagem da válvula e sua gaveta de atuação. A parte em azul ilustra a intercessão gerada entre o avanço da válvula dosadora e o orifício da tubulação:

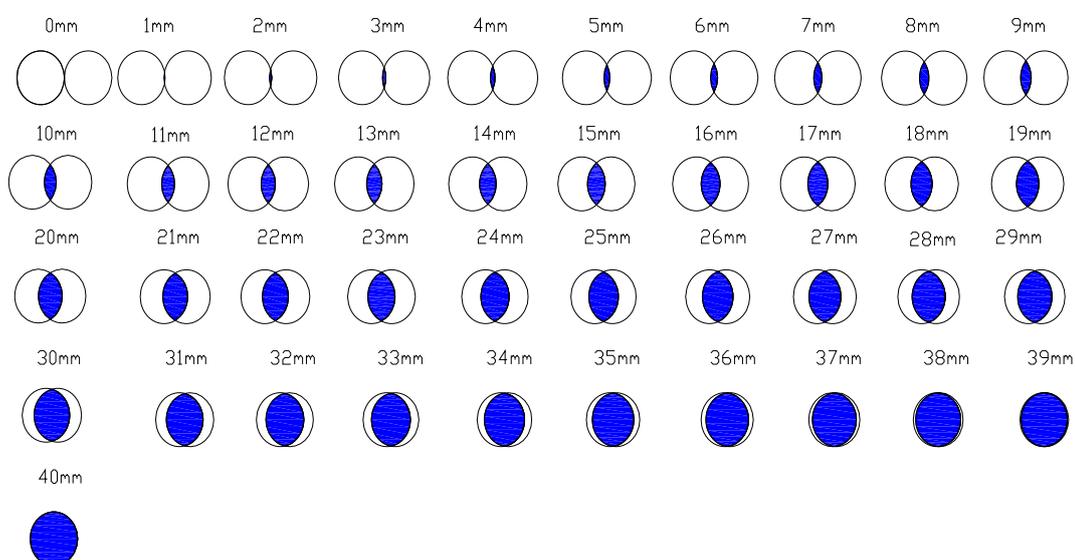


Figura 8.4 - Região de intercessão gerada pelo avanço da válvula dosadora

A Equação (8.15) obtém a distância y em mm de penetração da interseção dos círculos da válvula dosadora com orifício da tubulação do injetor em função do transdutor de posição (ZI) da válvula dosadora:

$$y = \frac{D \times ZI}{100\%} \quad (8.15)$$

Onde:

D = Diâmetro interno da válvula dosadora = 40 mm;

ZI = Posição atual da válvula dosadora de 0 a 100%.

A distância y da Equação (8.15) anterior é introduzida no modelo identificado para a área da válvula em por unidade (0,00 a 1,00) em função do transdutor de posição (ZI) da válvula dosadora. De posse da área da sessão reta transversal em função da posição da válvula dosadora, pode-se a determinar o coeficiente de Bernoulli para posterior cálculo da abertura inicial ótima.

A Equação (8.16) reproduz o modelo identificado pela curva da Figura 8.5 para a área a em por unidade visando facilidade nos cálculos do coeficiente de Bernoulli. Os valores na Equação (8.16) são válidos para $d > 6,4$ mm ou $ZI > 16\%$, sendo que a unidade resultante é adimensional:

$$a = \frac{A\%}{100\%} = \frac{36,81y - 235,5}{100\%} \quad (8.16)$$

A curva normalizada da área comum da superposição dos semicírculos do orifício e a placa da dosadora em função de seu deslocamento milimétrico ou percentual de posição são ilustradas na Figura 8.5 a seguir, sendo um gráfico extremamente útil para a modelagem proposta.

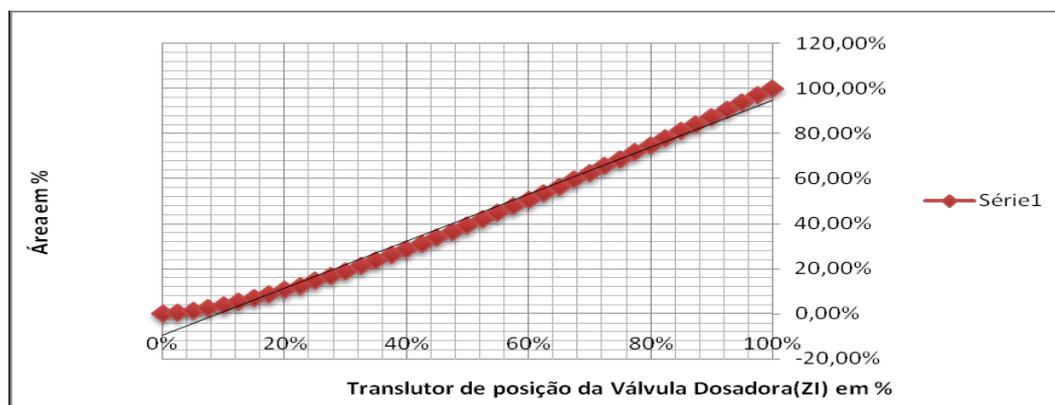


Figura 8.5 - Curva característica da válvula dosadora

Nota-se que a variação de área comum é praticamente linear na faixa de 32 a 100%, com um alto coeficiente de correlação de 0,998. Esta é justamente sua melhor faixa de controle. Portanto, para efeitos de modelagem, pode-se considerar a válvula dosadora como sendo linear em toda a faixa de controle de interesse. As descobertas destes ajustes de saturação máxima e mínima do controlador de vazão de carvão pela tese permitem que o controlador trabalhe na faixa linear da válvula.

A estrutura principal da FCV2 do trabalho realizado por [12] possui uma estrutura diferente da válvula dosadora usada na CSN. Fica claro que não há uma coerência linear entre a válvula de abertura e a vazão mássica resultante através da válvula de acordo com o visto na Equação (8.2) apesar da resposta linear de área transversal conjunta versus posição. Será mostrado posteriormente que um modelo linear funciona suficientemente bem para essa válvula. Nos trabalhos já efetuados na modelagem descrita anteriormente para a válvula dosadora descobriu-se que ela possui uma característica linear somente para valores acima de 32% de abertura.

A FCV2 tem uma zona morta também, que resulta do movimento da válvula gaveta. Para apertar a válvula tem que transpor a abertura por completo e um pouco mais por motivo de segurança. No caso de um bom controle para a vazão de carvão, a não-linearidade deve-se referir ao processo de injeção do vaso e não da válvula dosadora, pois se descobriu que ela possui característica linear somente acima de 30% de abertura. A não linearidade resultante não pode ser negligenciada no controle. Portanto, o controlador de vazão de carvão teve seus sinais das variáveis manipula limitados entre 32 e 100% como resultado da pesquisa desta tese.

8.7 MODELO FÍSICO DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO COM O VASO

O modelo físico determinístico do transporte pneumático com os vasos de injeção é realizado como se fossem tanques de pressão de armazenagem de 1ª ordem com sólidos ocupando o espaço físico de 25 m³, parcialmente ocupado em seu interior por carvão pulverizado.

As válvulas de controle de vazão e pressão de N₂ também não têm comportamento linear e sim quadrático, tal como visto no item 8.5. A área da válvula dosadora por sua vez possui um comportamento linear somente após 30% de abertura, porém a não-linearidade do modelo advém da raiz quadrada da diferença de pressão entre vaso e linha de transporte pneumático.

Outras não-linearidades surgem na etapa de mistura durante a formação do transporte pneumático de duas fases gás-sólido, tal como a expansão dos gases e a influência da temperatura final da mistura bifásica carvão-nitrogênio.

Os fluxos gás-sólido através da válvula dosadora seguem a lei fundamental de Bernoulli nos diz que o fluxo de um líquido incompressível, q , através de uma restrição pode ser obtido de um modo geral pela Equação (8.16) a seguir:

$$q(p_1, p_2) = af_{Liq}(p_1, p_2) = ka\sqrt{2\rho(p_1 - p_2)} \quad (8.16)$$

Onde:

p_1 : pressão na entrada da restrição, ou pressão a montante;

p_2 : pressão na saída da restrição, ou pressão a jusante, ou pressão do lado oposto;

ρ : densidade do fluido escoado;

a : área da seção transversal mínima da restrição da válvula de controle;

k : coeficiente de Bernoulli.

O carvão pulverizado pode ser considerado um fluido incompressível. Assim, para as análises a seguir, a vazão mássica de líquidos pode ser considerada a vazão mássica de sólidos, e a densidade será a do próprio carvão ($\rho_C = \rho$).

A pressão na entrada da restrição é a pressão do vaso, ou pressão de injeção, P_I . Na saída da válvula dosadora tem-se a pressão de transporte, ou pressão da linha principal, P_T . Usando-se a Lei de Bernoulli com as variáveis do processo no modelo, tem-se a Equação (8.17):

$$q_{C,F} = af_{Carvão}(p_1, p_2) = ka\sqrt{2\rho_C(P_I - P_T)} \quad (8.17)$$

Onde:

$q_{C,F} = Vz(t)$ = vazão de carvão em t/h pela válvula dosadora;

P_I : pressão de injeção do vaso em bar;

P_T : pressão de transporte, ou pressão na linha principal em bar;

ρ_C : densidade do carvão pulverizado em kg/m^3 ;

a : área da seção transversal da válvula dosadora normalizada.

Pelo princípio da conservação da massa, a vazão de carvão na linha é igual a vazão de carvão através da válvula dosadora conforme a Igualdade (8.18):

$$q_{C,L} = q_{C,F} \quad (8.18)$$

A vazão volumétrica de carvão na linha pode ser obtida pela Equação (8.19):

$$F_{C,L} = \frac{q_{C,L}}{\rho_C} \quad (8.19)$$

Para determinação do fluxo de gás nitrogênio que passa através da válvula dosadora, ($q_{N,C}$), tem-se que levar em consideração a compressibilidade do gás.

A Equação (8.20) expressa o fluxo mássico de um gás ideal que passa através da válvula dosadora:

$$q_{N,C} = q(p_1, p_2) = af_{\text{Gás}}(p_1, p_2) = ka\sqrt{2\rho_{NV}(p_I - p_T)} \quad (8.20)$$

Onde:

ρ_{NV} : densidade do N_2 para as condições de pressão e temperatura do vaso: (P_I e T_F).

A densidade real do nitrogênio nas condições do processo é dada pela Equação (8.19) e seu resultado é mostrado vaso a vaso na Figura 8.10 à frente.

$$\rho_{NV} = \frac{P_I T_o \rho_{N2}}{\rho_C T_F Z} \quad (8.21)$$

Onde:

P_I : Pressão de N_2 dentro do vaso na CNTP obtido por medição de instrumento;

T_o : Temperatura da CNTP = 273 K;

ρ_o : Pressão da CNTP = 1 atm

Z : 0,9998 = fator de compressibilidade do N_2 ;

ρ_{N2} : 1,2527 kg/m^3 = densidade do N_2 nas CNTP;

T_F : Temperatura final do fluxo bifásico de carvão e nitrogênio em Kelvin.

Considerando que a pressão do vaso é mantida constante durante a fase de injeção, o valor de $q_{N,C}$ pode ser obtido pelo balanço de massa do vaso de injeção de acordo com os fundamentos do capítulo 6, tem-se a Equação do (8.22) a seguir:

$$q_{N,C} = q_{N,P} + q_{N,F} - \frac{q_{C,L}}{\rho_C} \rho_{NV} \quad (8.22)$$

Nota-se que a soma das vazões de entrada de N_2 pelas válvulas de pressão e fluidização é maior que a saída de N_2 através da válvula dosadora devido a reposição do volume de carvão injetado e manutenção da pressão do vaso.

Considerando que o volume inicial de nitrogênio gasto na fase de pressurização do vaso é mantido constante ao longo de toda a fase de injeção. Aplicando-se a lei de conservação de massa tem-se a vazão mássica total de nitrogênio através da linha de TP principal igual à Equação (8.23):

$$q_{N,L} = q_{N,T} + q_{N,C} \quad (8.23)$$

8.8 PARÂMETROS CARACTERÍSTICOS DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

Os principais parâmetros usados na definição de um transporte pneumático de materiais sólidos granulados em fase densa, segundo [5] e [28], são:

- a - Relação sólido/gás $\mu > 5$;
- b - Densidade de fluxo;
- c - Velocidade das partículas de carvão, $c < 10$ m/s.

Estas são os principais parâmetros que diferenciam o transporte pneumático de fase densa em fase diluída. No transporte pneumático em fase diluída, a velocidade é alta levando a um maior desgaste da tubulação quando comparado com a fase densa. Além disto, a eficiência energética do transporte fase densa é maior, pois carrega mais sólidos com a mesma quantidade de gás.

8.8.1 Relação sólido/gás

A relação sólido/gás, conhecido como parâmetro μ , é uma grandeza adimensional definida pela Equação (8.24). Esta equação descreve a relação mássica entre o carvão e o nitrogênio que o transporta na linha em geral:

$$\mu = \frac{S}{G} \quad (8.24)$$

Onde

S: quantidade de carvão em kg;

G: quantidade de nitrogênio em kg.

A Equação (8.18) pode ser decomposta em termos de medições de vazões mássicas horárias de carvão e nitrogênio, tal como ilustra a Equação (8.25) abaixo:

$$\mu = \frac{S'}{G'} \quad (8.25)$$

Onde

S': Vazão mássica de carvão em kg/h;

G': Vazão mássica de nitrogênio em kg/h.

A Equação (8.28) pode sua vez também pode ser decomposta em termos de medições de vazões mássicas de carvão obtidas pelo algoritmo da média móvel do decréscimo do peso do vaso no tempo, descrito anteriormente, e as medições volumétricas de N_2 na linha principal, tal como ilustra a Equação (8.26), a seguir:

$$\mu = \frac{\text{Vazão de Carvão}}{\rho_{N_2} \times \text{Vazão Volumétrica de } N_2} = \left[\frac{\frac{t}{h}}{\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \frac{\text{m}^3}{h}} \right] = \left[\frac{t \times 1000}{\text{kg}} \right] = [1], \text{ adimensional} \quad (8.26)$$

A relação sólido/gás (μ) na linha principal de transporte pneumático finalmente no modelo pode ser expressa como a Equação (8.27) a seguir:

$$\mu = \frac{q_{C,L}}{q_{N,L}} \quad (8.27)$$

Na pior condição, a vazão de N_2 através da PCV é zero, e a relação sólido/Gás será a máxima ilustrada na Figura 8.10 conforme Equação (8.28)

$$\mu_{M\acute{a}x} = \frac{q_{C,L}}{q_{N,T} + q_{N,F}} \quad (8.28)$$

8.8.2 A densidade de fluxo e densidade de linha

A densidade de fluxo também é um importante parâmetro do transporte pneumático para se representar um número entre o zero e a máxima densidade com a tubulação preenchida totalmente com sólidos.

Quando a densidade de fluxo é zero pode significar geralmente que não há sólidos sendo levados pelo transporte pneumático, ou seja, somente vazão de nitrogênio de transporte, ou ainda sem vazão nenhuma de gases ou sólidos.

Já quando a densidade é máxima e a velocidade é zero pode significar que toda a tubulação de transporte pneumático esta entupida. As densidades típicas de carvões pulverizados analisados nos laboratórios da CSN apresentam valores entre 550 e 650 kg/m^3 , tipicamente 610 kg/m^3 conforme ilustra a Figura 8.10 a frente.

A densidade de um fluxo bifásico numa tubulação de transporte de carvão pulverizado sendo transportado por nitrogênio foi desenvolvida com base na modelagem de transporte pneumático.

A Equação (8.29) ilustra a definição de densidade de fluxo de transporte pneumático de carvão pulverizado:

$$D_F(t) = \frac{q}{V_T} \quad (8.29)$$

Onde:

$D_F(t)$: Densidade de fluxo na linha principal em kg/m^3 ;

q : quantidade de carvão mais quantidade de nitrogênio em kg;

V_T : Volume de carvão mais volume de nitrogênio em m^3 .

A Equação (8.30) aplica os dados do modelo desenvolvido nesta tese para o cálculo da densidade de fluxo em tempo real pelo SDCD na linha.

$$D_F(t) = \frac{q_{C,L} + q_{N,L}}{F_{C,L} + F_{N,L}} = \frac{q_{C,F} + q_{N,L}}{\frac{q_{C,L}}{\rho_C} + \frac{q_{N,L}}{\rho_{NT}}} \quad (8.30)$$

Onde:

$q_{C,L}$: Vazão de carvão na linha principal;

$q_{N,L}$: Vazão de N_2 de transporte mais vazão de N_2 através da válvula dosadora;

ρ_C : Densidade do carvão pulverizado;

ρ_{NT} : Densidade do N_2 desnormalizado para as condições do processo.

A densidade real do nitrogênio nas condições do processo das tubulações de transporte principal é dada pela Equação (8.31) a seguir, conforme [79].

$$\rho_{NT} = \frac{P_T T_o \rho_{N2}}{\rho_C T_F Z} \quad (8.31)$$

Onde:

P_T : Pressão de N_2 de transporte na CNTP obtido por medição de instrumento;

Levando-se em consideração a densidade real do N_2 no processo, a definição de μ na Equação (8.25) associada a Equação (8.31) pode-se ser usada na dedução da Equação geral (8.32) para a densidade de fluxo na linha de transporte:

$$D_F(t) = \frac{\mu + 1}{\frac{\mu}{\rho_C} + \frac{P_o T_F Z}{P_T T_o \rho_{N2}}} \quad (8.32)$$

O sistema de medição de vazão de carvão pulverizado descrito no capítulo 6 mede diretamente esta mesma a densidade de fluxo. Portanto, ele é usado para validação deste parâmetro calculado pela modelagem do transporte pneumático da estação de injeção de carvão pulverizado.

A densidade de linha é outro parâmetro do transporte pneumático necessário no dimensionamento de tubulações e determinação do coeficiente de atrito para cálculo da perda de carga na tubulação.

A Equação (8.33) aplica os dados do modelo desenvolvido nesta tese para o cálculo da densidade de linha em tempo real pelo SDCD.

$$D_L(t) = \frac{q_{C,L} + q_{N,L}}{AL} \quad (8.33)$$

Onde:

A: Área da seção reta transversal de cada tubulação de transporte pneumático;

L: Unidade de comprimento linear da tubulação = 1 m.

Os resultados dos modelos de densidades de linha em tempo real ao longo das tubulações de transporte pneumático com diferentes diâmetros e ramificações são mostrados nas Figuras 8.11 e 8.12 adiante.

8.8.3 Temperatura final do fluxo bifásico

A temperatura do carvão influencia em sua combustibilidade. Quanto mais quente mais rápida e eficiente será sua queima [13]. Ela também influencia em sua fluxabilidade devido a umidade intrínseca, o que pode facilitar ou dificultar o transporte pneumático. Quanto mais úmido pior será para a fluxabilidade do carvão e, portanto maior será a variabilidade e dificuldade no controle de vazão de carvão que ele seja global ou individual, tal como descrito em [74].

A máxima umidade permitida para transporte segundo [74] é de 6%. Na As moagens de carvão geralmente produzem um carvão pulverizado com umidade variando de 0,8 a 2% dependendo da época do ano. Para as estações chuvosas como o verão, a umidade atinge seus maiores níveis.

O trabalho [80] descreve um instrumento de última geração de medição em tempo real da umidade do carvão pulverizado produzido. Ele é utilizado para se ajustar os parâmetros operacionais da moagem de carvão de forma a produzir o carvão pulverizado com a menor umidade possível na CSN. É visto e comprovado que quanto menor for a umidade do carvão pulverizado melhor será sua fluxabilidade e, portanto menor será sua variabilidade na vazão.

Um dos principais fatores que afetam a umidade do carvão pulverizado é a sua temperatura de produção logo após a saída do moinho conforme relatam [3] e [32]. Por sua vez, a temperatura do carvão também afeta sua combustibilidade [13].

Alguns projetos de melhoria de planta de PCI incluem o revestimento com isolante térmico do silo de armazenagem de carvão pulverizado de forma a preservar sua temperatura. Outros projetos prevêm o pré-aquecimento do carvão pulverizado na linha de transporte principal através de trocadores de calor. São usados também equipamentos desgaseificadores logo após o pré-aquecimento para a eliminação de umidade residual num outro vaso de injeção tipo distribuidor receptor.

A temperatura final do fluxo bifásico de carvão pulverizado e nitrogênio na tubulação de transporte pneumático principal, T_F , também pode ser usada para determinar e avaliar a eficiência de combustão no “Raceway” do alto-forno. A temperatura final calculada é usada, por exemplo, na determinação teórica da densidade de fluxo na linha principal, tal como na Equação (8.27) e será usada em muitas outras equações dos modelos dinâmicos do TP e da estação de injeção.

De acordo com Mills [5], o modelo térmico é baseado na lei do balanço de energia. Portanto, o modelo para a temperatura final do fluxo bifásico do transporte pneumático é descrito pela Equação (8.34) a seguir desenvolvida pela tese.

$$T_F(t) = \frac{q_{C,L} C_C T_C + q_{N,L} C_N T_N}{(q_{C,L} + q_{N,L}) C_C} \quad (8.34)$$

Onde:

C_C : calor específico do carvão = 1,3 em kcal/(h.m.°C);

C_N : Calor específico do nitrogênio = 1,0 em kcal/(h. m.°C);

T_N : temperatura do nitrogênio de abastecimento da estação em °C;

T_C : temperatura média do carvão produzido no filtro de mangas em °C;

T_F : temperatura final da mistura carvão/nitrogênio (70 a 80°C).

Os valores típicos da temperatura do carvão na saída do filtro de mangas vão de 90 a 93°C e dependem fundamentalmente da temperatura de saída de moinho e do filtro de mangas que é ajustada pelo operador entre 95 e 97°C. Estima-se que o carvão pulverizado produzido perca cerca de 10 °C durante seu período de armazenagem no silo de finos.

Já a temperatura do nitrogênio é muito similar a temperatura ambiente variando de 15 a 45°C conforme a hora do dia ou da noite e a estação do ano. A Equação (8.34) foi incluída nos cálculos realizados pelo SDCD em tempo real.

A Figura 8.6 a seguir ilustrar uma imagem térmica do injetor de carvão (T) localizado logo abaixo da válvula dosadora. Nota-se a temperatura do nitrogênio em um dia quente de verão de 39,9°C. As imagens térmicas obtidas validam o modelo da temperatura final proposto pela Equação dinâmica (8.34).

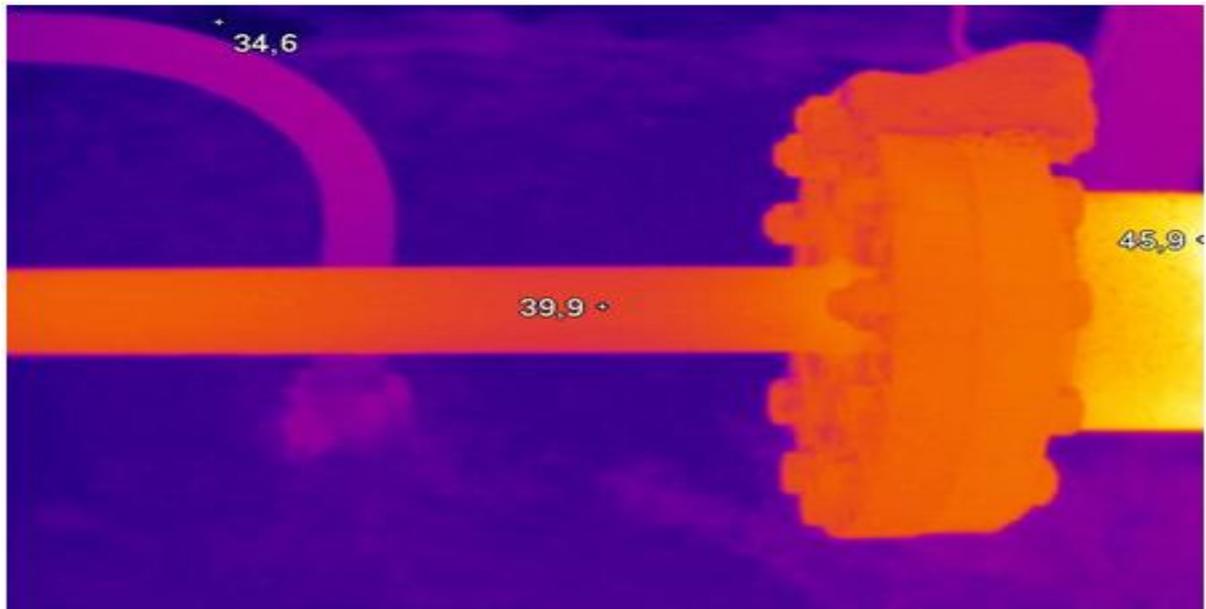


Figura 8.6 - Imagem térmica do nitrogênio no injetor da linha de transporte principal

A Figura 8.7 reproduz a imagem térmica do fluxo bifásico carvão-nitrogênio na linha de transporte principal, onde pode-se ver a temperatura final de 78°C.

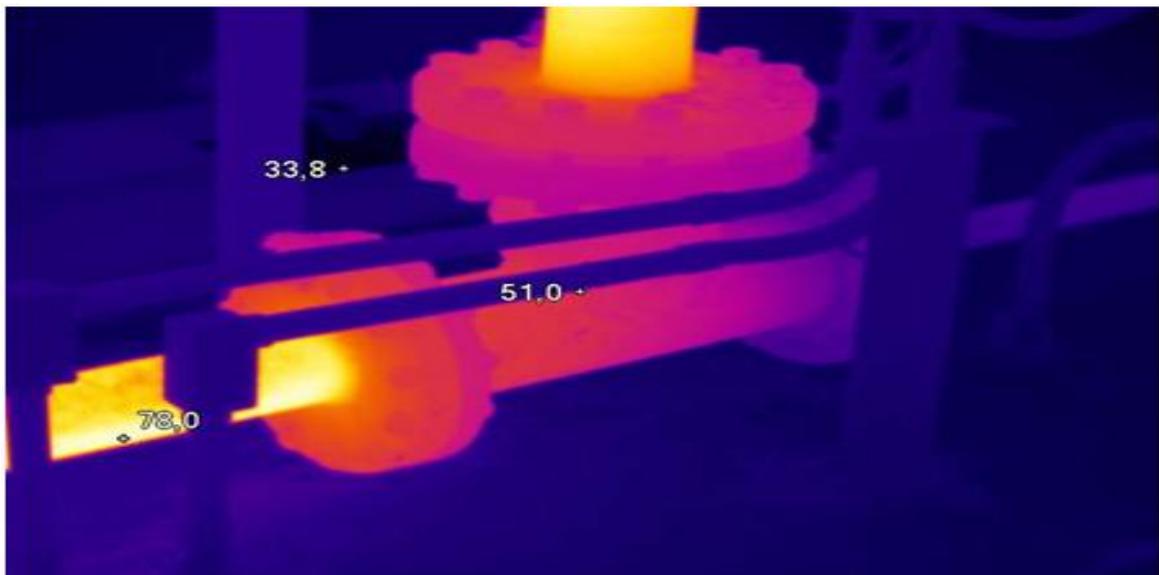


Figura 8.7 - Imagem térmica do fluxo bifásico carvão-nitrogênio na linha de transporte principal

8.8.4 A velocidade das partículas de carvão

De acordo com Nora [55], se a velocidade da partícula é menor do que 2 m/s existe o risco de entupimento devido a coqueificação de carvão especialmente na ponta da lança de injeção onde são retirados pelo operador da sala de corridas do alto-forno cilindros de grafite de até 50 mm de comprimento com diâmetro igual ao interno da lança de injeção. Este é um dos principais problemas de uma planta PCI.

Como o transporte pneumático é realizado através de uma linha principal até o distribuidor e então conduzido por linhas de transporte individuais até a lança de injeção ou até a bifurcação em “Y” da lança dupla de injeção, deve-se analisar as velocidades e vazões em cada ponto de restrição da linha de transporte pneumático.

A velocidade do fluido bifásico C em m/s é definida nesta modelagem pela Equação (8.35) onde as vazões mássicas de carvão e nitrogênio são somadas e então divididas pela densidade de fluxo.

$$C = \frac{F}{A} = \frac{q/\rho}{A} = \frac{(q_{C,L} + q_{N,L})}{\rho_F A} \quad (8.35)$$

Onde:

F: Vazão volumétrica de carvão mais vazão de nitrogênio em m³/s;

A: Área de secção reta transversal da tubulação pneumática em questão em m².

A densidade do fluxo bifásico ρ_F em kg/m³ é calculada em tempo real pelo SDCD com o auxílio da Equação (8.36) abaixo:

$$\rho_F(t) = \frac{q_{C,L}\rho_C + q_{N,L}\rho_{N_2}}{(q_{C,L} + q_{N,L})} \quad (8.36)$$

8.9 MODELO DE PERDA DE CARGA DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O desenho, trajeto e projeto da linha de transporte pneumático são de fundamental importância para o diagrama de queda de pressão por comprimento de linha, tal como nos exemplos de [5] e [28].

Portanto, o diagrama isométrico ou croqui da tubulação pneumática com os diâmetros internos das linhas principais e ramais e bifurcações tem que ser levantado e conhecido. Este comprimento equivalente será utilizado no cálculo do comprimento equivalente da tubulação na determinação do modelo de perda de carga. Este conhecimento necessário pode ser resumido em:

- Comprimento da linha na horizontal e na vertical;
- Número de curvas de 45 e 90°;

- Diâmetros internos das tubulações de transporte.

Assim o comprimento equivalente da tubulação para o modelo de perda de carga é calculado como na Equação (8.37):

$$L_E = h + 2v + N_{45} b_{45} + N_{90} b_{90} \quad (8.37)$$

h: comprimento total da tubulação na horizontal em m;

v: comprimento total da tubulação na vertical em m;

N_{45} : Número de curva de 45°;

b_{45} : comprimento equivalente da curva de 45° = 0,2 m;

N_{90} : Número de curva de 90°;

b_{90} : comprimento equivalente da curva de 90° = 1,5 m;

A Tabela 8.2 ilustra os dados dimensionais obtidos dos desenhos das linhas de transporte pneumático para os Alto-fornos 2 e 3, sendo que para o Alto-forno 3 têm-se as rotas distintas ímpar (AF3.1) e par (AF3.2).

Tabela 8.2 - Levantamento de dados da linha de transporte pneumático				
Rede de Finos de Carvão e Nitrogênio do PCI ao distribuidor do AF#2				
Trecho reto total:	404457	mm		
Trecho horizontal:	385627	mm	95,34	%
Trecho vertical (+):	18830	mm	4,66	%
Peças especiais:	Peça:	Quantidade	k	TOTAL
	Curva 45°	18	0,15	2,7
	Curva 90°	1	0,6	0,6
Rede de Finos de Carvão e Nitrogênio do PCI ao distribuidor do AF#3.1				
Rota de injeção AF3.1				
Trecho reto total:	148093	mm		
Trecho horizontal:	126072	mm	85,13	%
Trecho vertical (+):	22021	mm	14,87	%
Peças especiais:	Peça:	Quantidade	k	TOTAL
	Curva 45°	12	0,15	1,8
	Curva 90°	1	0,6	0,6
Rota de injeção AF3.2				
Trecho reto:	131293	mm		
Trecho horizontal:	109272	mm	83,23	%
Trecho vertical:	22021	mm	16,77	%
Peças especiais:	Peça:	Quantidade	k	TOTAL
	Curva 45°	10	0,15	1,5
	Curva 90°	1	0,6	0,6

De uma maneira geral, a queda de pressão em N/m^2 calculada no modelo do perfil de pressão ao longo da tubulação pneumática em tempo real realizada no SDCD usa a Equação (8.38) conhecida como Equação de Darcy, segundo Mills [5]:

$$\Delta P_L = \left(\frac{4f}{L_E} + \sum k \right) + \rho_F C^2 \quad (8.38)$$

Onde:

f: coeficiente de fricção das tubulações e ramais de acordo com [5], $f=0,005$;

k: coeficiente de queda de pressão através das curvas de 45 e 90° de acordo com a Tabela 8.2 e obtidos da fonte [5] e [28];

C: velocidade do fluxo bifásico calculada pela Equação (8.29) em m/s;

ρ_F : densidade do fluxo bifásico calculada pela Equação (8.30) em kg/m^3 ;

L_E : comprimento equivalente da tubulação calculada pela Equação (8.37) em m.

Assim, a queda de pressão ΔP_L calculada pelo modelo dinâmico da Equação (8.32) é comparada com a medida em tempo real na linha de transporte principal para efeitos de comprovação e validação do modelo de queda depressão.

Portanto, a perda de carga medida ΔP_M é calculada pela Equação (8.39):

$$\Delta P_M = P_T - P_D \quad (8.39)$$

Onde:

ΔP_M : Cálculo da queda de pressão na linha principal em bar;

P_T : Pressão de transporte medido por instrumento antes do injetor de carvão em bar;

P_D : Pressão do fluxo bifásico antes do distribuidor estático de carvão em bar.

Para adequação e comprovação do modelo matemático do perfil de queda de pressão na tubulação, foi instalado mais um transmissor de pressão na curva de 90° que se encontra estrategicamente bem antes do distribuidor.

Não se encontrou nenhuma literatura com desenvolvimento semelhante que aborda esta medição prática em linha industrial tal como obtido através da implantação de um medidor especial desenvolvido nesta tese na CSN em conjunto com a empresa Emerson Process, especialista em instrumentação dedicada.

As vantagens da implementação da medição de pressão manométrica inserida na curva de 90° da linha principal do transporte pneumático antes do distribuidor de carvão são:

- a - Melhoria do intertravamento de pressão diferencial entre o PCI e o alto-forno;
- b - Avaliação do grau de entupimento do distribuidor de carvão;
- c - Determinação do melhor ponto de operação para a pressão de injeção do vaso.

Além disto, o intertravamento de segurança de pressão diferencial proporcionado pelo novo transmissor previne o arrebentamento dos tubos flexíveis de aço das lanças injeção nas salas de corridas dos altos-fornos.

A Figura 8.8 ilustra o transmissor de pressão manométrico com flange de 6" e selo remoto estendido de 150 mm. Ele pode ser usado para validar os cálculos efetuados pelos modelos matemáticos descrito nesta tese com o auxílio do modelo de queda de pressão na linha principal.

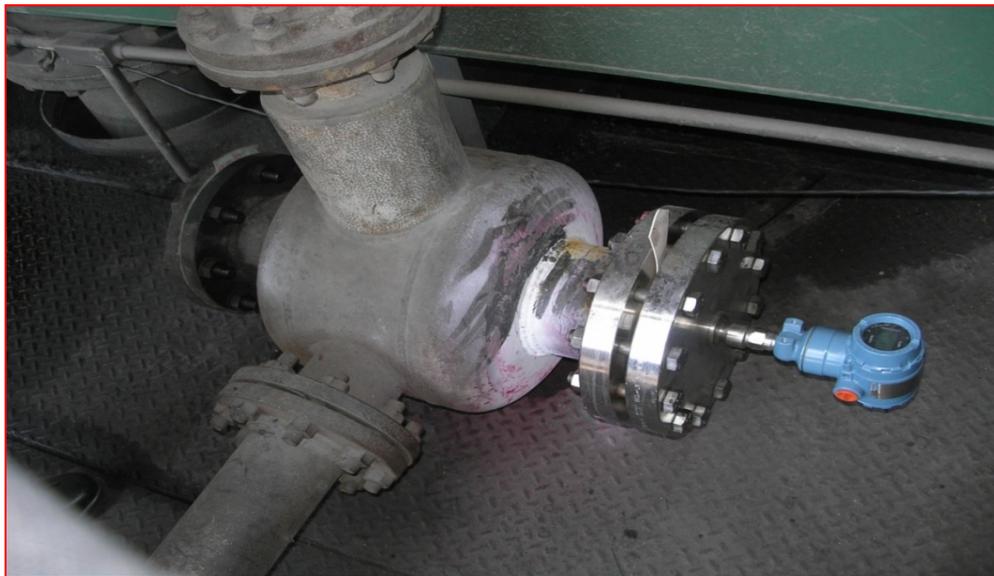


Figura 8.8 - Transmissor de pressão especial para o transporte pneumático

O diagrama de pressão usa as principais medições de pressão do processo:

- Pressão de abastecimento da estação de injeção, P_N ;
- Pressão do vaso de injeção, P_i ;
- Pressão na linha de transporte, P_T ;
- Pressão na curva de 90° antes do distribuidor, P_D ;
- Pressão de sopro do alto-forno, P_{AF} .

Os diagramas de pressão do transporte pneumático e mostram os resultados do modelam as quedas de pressão graficamente ao longo da linha principal e de suas derivações.

A queda de pressão ao longo da linha de transporte pneumático é usada nas ordenadas do diagrama de estado conforme [2] e especialmente [55], [56] e [57]. Portanto, este fenômeno deve ser conhecido para se evitar entupimentos ao longo do trajeto do transporte pneumático.

A Figura 8.9 ilustra os resultados obtidos para o diagrama de pressão em tempo real comparado com o valor calculado pelo modelo descrito nesta tese.

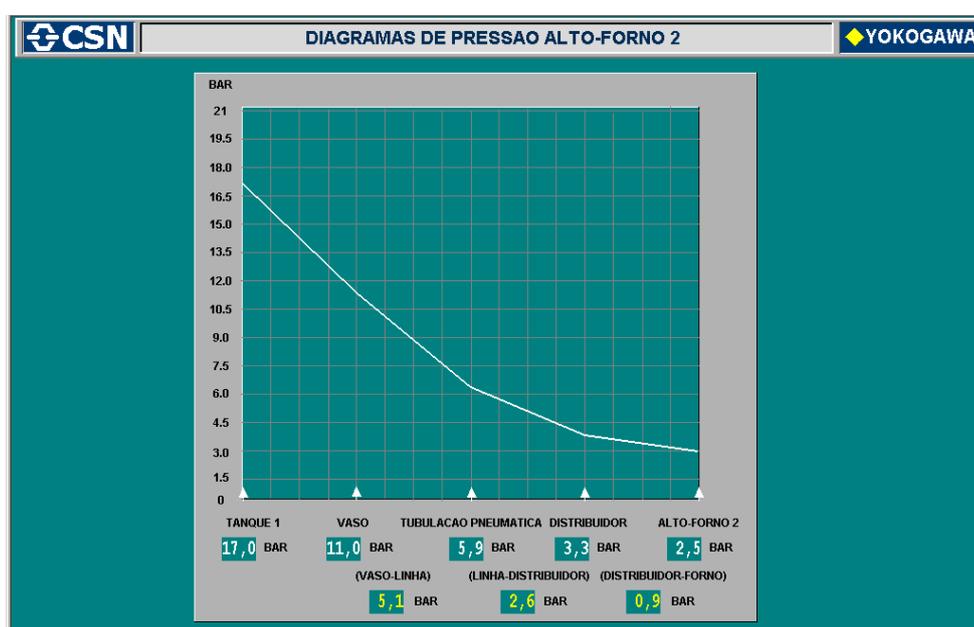


Figura 8.9 - Perfil de pressão ao longo das linhas do transporte pneumático

8.10 MODELO DINÂMICO DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

As matrizes de representação do modelo dinâmico em equações de estados dos parâmetros e variáveis dinâmicas do transporte pneumáticas obtidas através de equações do estado físico são descritas pelas matrizes a seguir:

As matrizes de excitação e de estado são descritas na Equação matricial (8.40) abaixo:

$$\dot{\mathbf{x}} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & q_{CL} & 0 \\ \frac{q_{NP}}{F_{CL} + F_{NL}} & \frac{q_{NF}}{F_{CL} + F_{NL}} & -\frac{q_{CL}}{F_{CL} + F_{NL}} & \frac{q_{NT}}{F_{CL} + F_{NL}} \\ \frac{q_{NP}}{A} & \frac{q_{NF}}{A} & \frac{q_{CL}}{A} & \frac{q_{NT}}{A} \\ \psi \rho_F \frac{q_{NP}^2}{A^2} & \psi \rho_F \frac{q_{NF}^2}{A^2} & \psi \rho_F \frac{q_{CL}^2}{A^2} & \psi \rho_F \frac{q_{NT}^2}{A^2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times [U_P \quad U_F \quad U_c \quad U_T] \quad (8.40)$$

A matriz de saída (8.41) representa as principais variáveis do transporte pneumático como resultado da modelagem dinâmica do transporte pneumático:

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_Z(t) \\ D_F(t) \\ C(t) \\ \Delta P_L(t) \end{bmatrix} \quad (8.41)$$

A matriz de erro (8.42) é efetuada no SDCD em tempo real e contém a comparação tempo a tempo das medidas efetuadas e os resultados dos modelos para validação e interpretação dos dados obtidos.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{bmatrix} \varepsilon_1(t) \\ \varepsilon_2(t) \\ \varepsilon_3(t) \\ \varepsilon_4(t) \end{bmatrix} \quad (8.42)$$

Os modelos dinâmicos desenvolvidos nesta tese para o transporte pneumático efetuado pelas estações de injeção de carvão pulverizado são ilustrados na Figura 8.10:

CSN		MODELO DINÂMICO DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO DE CARVÃO AF2		YOKOGAWA	
SÍMBOLO	DESCRIÇÃO	DETALHE	VALORES	UNIDADE DE ENG.	
C _{requ}	Injeção de Carvão	Valor Requerido Vazão Carvão para Alto-Forno 2 da CSN	18,26	t/h	
C _{Max}	Vazão Max. Injeção Carvão	Ajuste Vazão Max. Carvão Transp. Pneumatico	50,00	t/h	
C _{Min}	Vazão Min. Injeção Carvão	Ajuste Vazão Min. Carvão Transp. Pneumatico	10,00	t/h	
P _{Max}	Pressão Max. Transp. Vaso	Ajuste Pressão Max. Vaso Injeção	13,00	bar	
P _{Min}	Pressão Min. Transp. Vaso	Ajuste Pressão Min. Vaso Injeção	10,00	bar	
V _t Max	Vazão Max. Transp. Vaso	Ajuste Vazão Max. Transp. Vaso Injeção	1300,00	Nm ³ /h	
V _t Min	Vazão Min. Transp. Vaso	Ajuste Vazão Min. Transp. Vaso Injeção	900,00	Nm ³ /h	
V _f Max	Vazão Max. Fluid. Vaso	Ajuste Vazão Max. Fluidização Vaso Injeção	500,00	Nm ³ /h	
V _f Min	Vazão Min. Fluid. Vaso	Ajuste Vazão Min. Fluidização Vaso Injeção	250,00	Nm ³ /h	
P _n	Pressão Alimentação	Pressão Rede de N ₂	16,19	bar	
P _i	Pressão Int. Vaso Injeção	"Set-Point" em função da Vazão de carvão	10,64	bar	
P _t	Pressão Linha Principal	Pressão do Transporte Pneumatico	5,57	bar	
Delta P _{FCV2}	Perda de Carga através da FCV2	Queda de Pressão Válvula Dosadora	5,35	bar	
Delta P _m	Queda Pressão Linha Principal	Perda Pressão Medida Durante Fase de Injeção	*****	bar	
P _d	Pressão Linha Antes Distribuidor	Pressão Distribuidor de Carvão	*****	bar	
P _{af}	Pressão de Ar Quente Soprado no AF	Pressão do Alto-forno 2 da CSN	2,29	bar	
Delta P _L	Queda de pressão na linha principal	Calculada pela Equação de Darcy	0,86	bar	
p _{N2}	Densidade N ₂ CNTP	Densidade do Nitrogenio na CNTP	1,2527	kg/Nm ³	
p _C	Densidade Carvão Pulverizado	600 a 800 Kg/m ³ Dependendo do Carvão	610	kg/m ³	
p _{NV}	Densidade N ₂ dentro do Vaso	Densidade do N ₂ na Pressão e Temperatura interna	10,3286	kg/m ³	
p _{NT}	Densidade N ₂ na Linha Principal	Densidade do N ₂ na Pressão e Temperatura na Linha	5,2701	kg/m ³	
p _F	Densidade do Fluxo Bifásico na Linha	Densidade do (N ₂ + Carvão) na Linha Principal	554	kg/m ³	

Figura 8.10 - Modelos Dinâmicos do Transporte Pneumático

8.11 DIAGRAMAS DAS VELOCIDADES DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

O diagrama das velocidades e vazões ao longo as linhas de transporte pneumático com diferentes diâmetros internos é de fundamental importância para a determinação dos estados de transporte e evitar entupimentos em lanças.

Usando-se a equação da continuidade e o número de lanças injetando em tempo real (obtido pelo limite de aberto das válvulas de carvão do distribuidor), pode-se montar o diagrama das velocidades das partículas de carvão ao longo de toda a tubulação de transporte pneumática. Observa-se que os diâmetros internos das tubulações de transporte pneumático diminuem e as derivações se multiplicam.

A Equação (8.43) calcula a vazão de carvão na linha após o distribuidor, sendo um modelo para lança simples e para lança dupla de injeção com tubos de ¾" externo em Schedule 160 (diâmetro interno =15,7 mm):

$$Q1_{C,L} = \frac{q_{C,L}}{A_1 M} \quad (8.43)$$

Onde:

$q_{C,L}$ = vazão de carvão na linha principal antes do distribuidor;

M = Número de válvulas de carvão abertas após o distribuidor em tempo real;

A_1 = área da seção reta transversal da lança simples ($d=15,7\text{mm}$)

A Equação (8.44) calcula a vazão de nitrogênio na linha após o distribuidor modelo para lança simples e para lança dupla de injeção com tubos de $\frac{3}{4}$ " externo em Schedule 160 (diâmetro interno =15,7 mm):

$$Q1_{N,L} = \frac{q_{N,L}}{A_1 M} \quad (8.44)$$

A Equação (8.45) calcula a vazão de carvão na linha após o distribuidor, sendo um modelo para lança simples e para lança dupla de injeção com tubos de $\frac{3}{4}$ " externo em Schedule XXS (diâmetro interno =11,7 mm):

$$Q2_{C,L} = \frac{q_{C,L}}{2A_2 M} \quad (8.45)$$

A_2 = área da seção reta transversal da lança Schedule XXS ($d=11,7\text{mm}$)

A Equação 8.46 calcula a vazão de nitrogênio na linha após o distribuidor modelo para lança simples e para lança dupla de injeção com tubos de $\frac{3}{4}$ " externo em Schedule XXS (diâmetro interno =11,7 mm):

$$Q2_{N,L} = \frac{q_{N,L}}{2A_2 M} \quad (8.46)$$

A modelagem descrita nas equações anteriores foi implementada em tempo real no SDCD de maneira contínua conforme ilustra a Figura 8.7, inicialmente para a lança de injeção simples com tubos de Schedule 160 ($d = 15,7 \text{ mm}$). Nota-se que as variáveis de entrada são as vazões de carvão e nitrogênio.

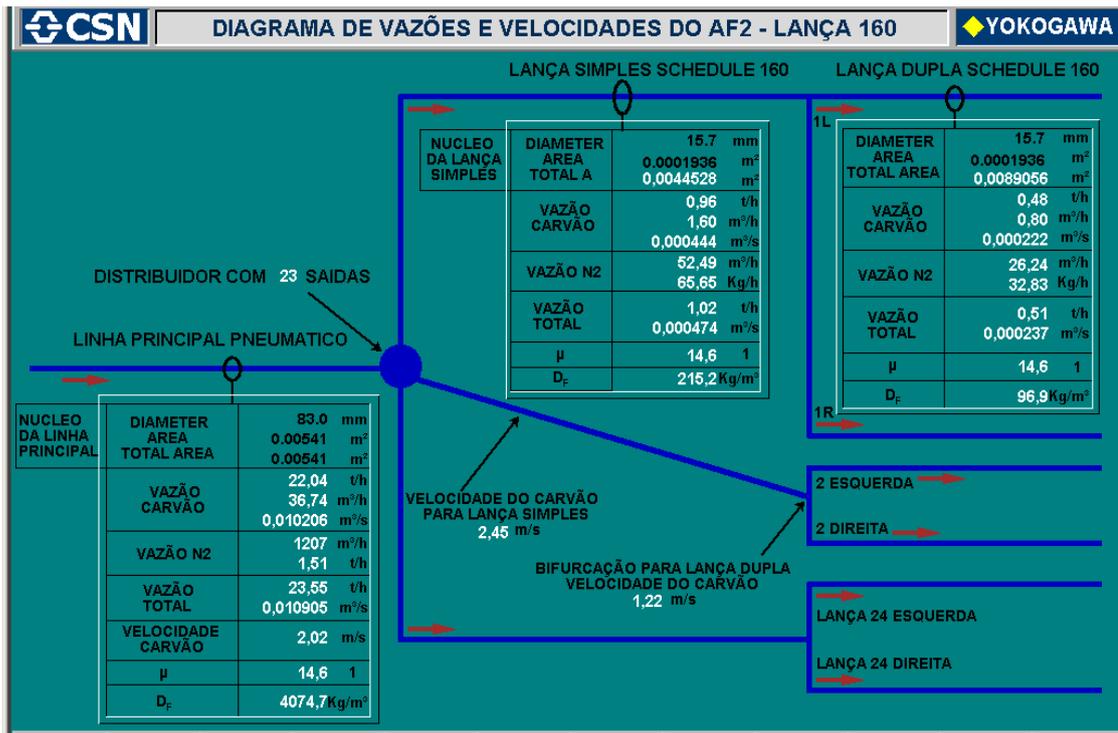


Figura 8.11 - Modelo de velocidade para lança de injeção simples (Schedule 160)

Nota-se que a velocidade da partícula na lança dupla usando tubos Schedule 160 é menor que 2 m/s aumentando a probabilidade de entupimentos de lança devido a mudança de estado do transporte de fase densa para rolhas ou dunas conforme visto no capítulo 2.

A densidade de fluxo e a relação sólido/gás se mantêm constante ao longo das tubulações pneumáticas de diâmetros diferentes com diversas ramificações. A densidade de linha ou kg de sólido por volume linear da tubulação por sua vez cai na medida em que a vazão é dividida.

Para se evitar velocidades críticas menores que 2 ou até próximas de 1 m/s obtidas nas simulações de uma planilha do EXCEL, especialmente para vazões de carvão menores que 20 t/h, foi especificado uma nova lança de injeção com diâmetro interno menor de 11,7 mm “Schedule XXS” de modo que o transporte pneumático não seja alterado de forma significativa e que não haja risco de entupimento devido às vazões e velocidades de transporte pneumático baixos.

A principal função da lança dupla de carvão é promover o espalhamento das partículas sólidas na zona de combustão melhorando o contato com as moléculas de oxigênio acelerando a reação de combustão e por fim melhorando a taxa de substituição de coque por carvão, de acordo com [14] e [32] e principalmente [36].

Isto tudo tem que ser realizado de tal forma que não haja grandes modificações no transporte pneumático e principalmente um consumo elevado de gás de transporte, N₂, o que poderia ultrapassar a capacidade dos compressores além da inserção de gás inerte no alto-forno aumentando o volume de gás.

Efetuada-se os cálculos de áreas internas das lanças Schedule 160 e Schedule XXS, nota-se que a soma das duas áreas das seções retas transversais da lança dupla com diâmetros interno de 11,7 mm equivalem a apenas 10% a mais da área equivalente de uma lança simples Schedule 160, ou seja, praticamente a mesma área, conforme Figura 8.12.

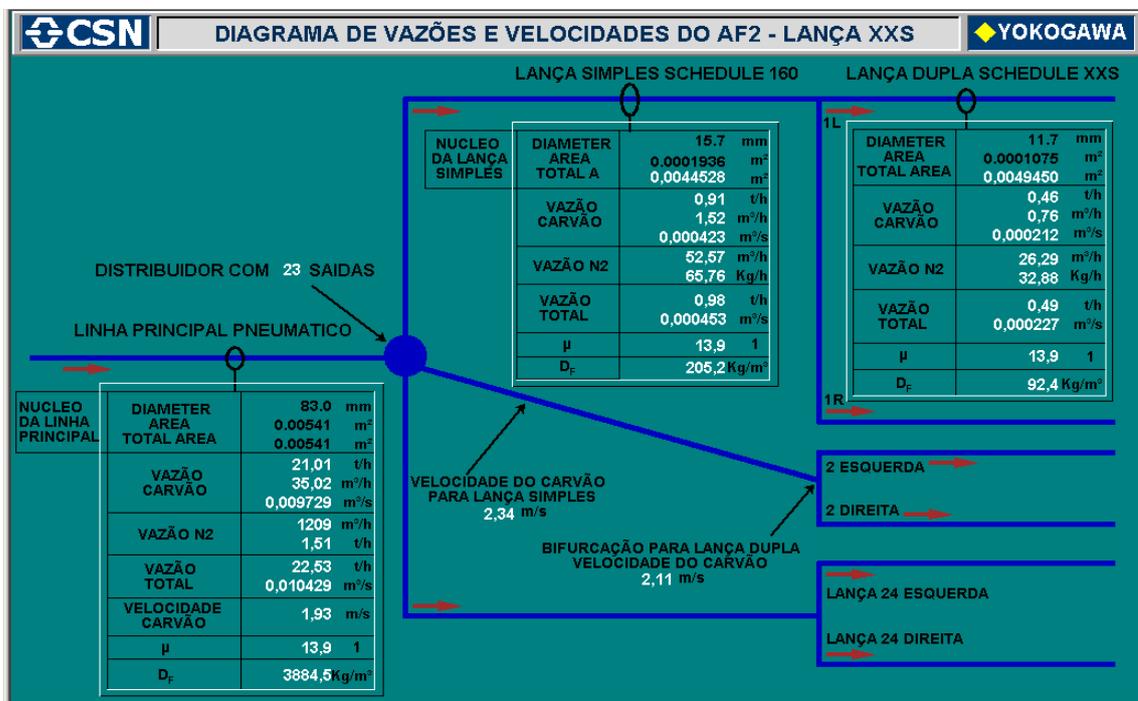


Figura 8.12 - Modelo de velocidade para lança de injeção dupla (Schedule XXS)

As duas modelagens de velocidade executados pelo SDCCD, uma direta ($V_z(t)/A$) e outra indireta (ΔP_L), podem ser comparadas com o valor medido pelo Densflow. Deve-se escolher o modelo ou medição que fornece o maior valor de velocidade ou velocidades acima de 2 m/s por questões de segurança, visando principalmente mitigar os entupimentos das lanças de injeção.

8.12 VALIDAÇÕES E RESULTADOS DOS MODELOS

As validações e resultados dos modelos dinâmicos do transporte pneumático podem ser entendidos com o diagrama em blocos da Figura 8.13:

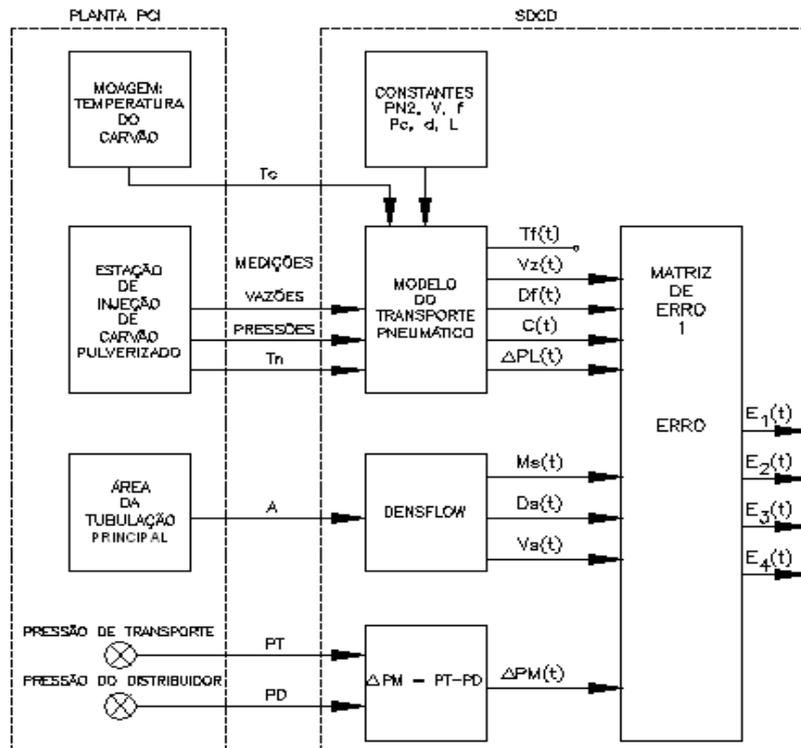


Figura 8.13 - Diagrama em blocos para verificação dos modelos desenvolvidos

O diagrama em blocos para verificação dos modelos desenvolvidos é dividido em duas áreas delimitadas por linhas tracejadas: a Planta PCI e o SDCD.

Os modelos para a temperatura final do fluxo bifásico, a vazão de carvão, a densidade de fluxo, velocidade e queda de pressão na linha principal são efetuados no SDCD onde existe a entrada de dados, das constantes e das medições de instrumentação em tempo real usadas nos modelos dinâmicos do TP.

Os sinais de instrumentação adicionais do “Densflow” e dos transmissores de pressão de transporte e pressão do distribuidor são usados para validar os modelos de comportamento do transporte pneumático.

A Figura 8.14 contém os resultados dos modelos comparados em tempo real com as medições efetuadas pelo SDCD:

Parametros do Transporte Pneumatico do Alto-forno 2				
SIMBOLO	DESCRIÇÃO	DETALHE	VALORES	UNIDADE DE ENG.
U	Relação de KgCarvão / kgN2	Parametro do Transporte Pneumatico	12,76	1
U max	Maxima relação de KgCarvão / kgN2	Quando PCV fechada, FNP = 0	12,74	1
C(t)	Velocidade Part. Carvão Linha Principal	Parametro do Transporte Pneumatico	2,23	m/s
DF(t)	Dens. Carvão Linha Principal calculado	Densidade de fluxo na linha principal	172,32	kg/m³
DS(t)	Dens. Carvão Linha Principal Medida	Densidade de fluxo medida pelo Densflow	204,69	kg/m³
Tn	Temperatura do N2 Alimentação	Temperatura N2	53,89	Celsius
Tc	Temperatura Media do Carvão	Temperatura Obtida na saida do Silos de Finos	91,69	Celsius
Tf(t)	Temperatura do fluxo bifasico	Temperatura Obtida pelo modelo de temperatura	85,14	Celsius

Figura 8.14 - Resultados dos modelos do transporte Pneumático do Alto-forno 2

A Figura 8.15 contém os gráficos de tendência com as velocidades do fluxo bifásico calculadas pelo modelo e medida da velocidade pelo “Densflow”.

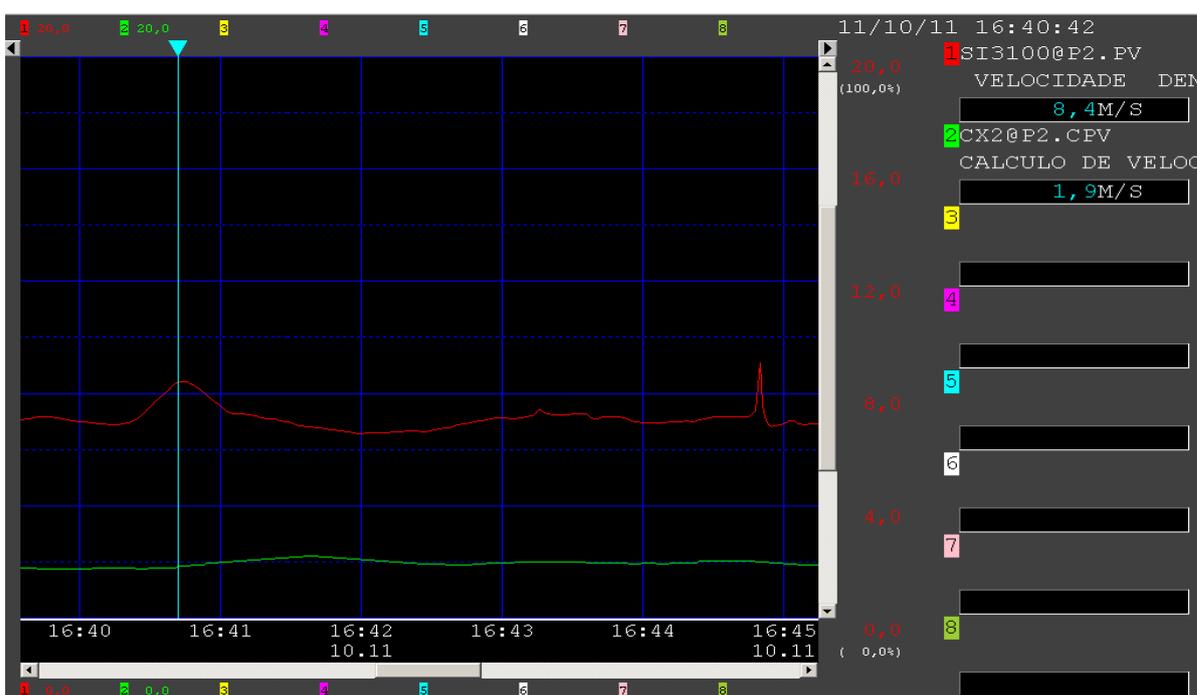


Figura 8.15 - Resultados dos modelos de velocidade do Transporte pneumático do Alto-forno 2

A Figura 8.16 complementa a Figura 8.15 para a coleta de dados e interpretação dos sinais de erro obtidos. Nota-se que as variações de velocidade do processo são sentidas tanto pelo modelo quanto pelo Densflow, porém com amplitudes proporcionais (4:1) e atrasos conhecidos (Média móvel de 1 min).

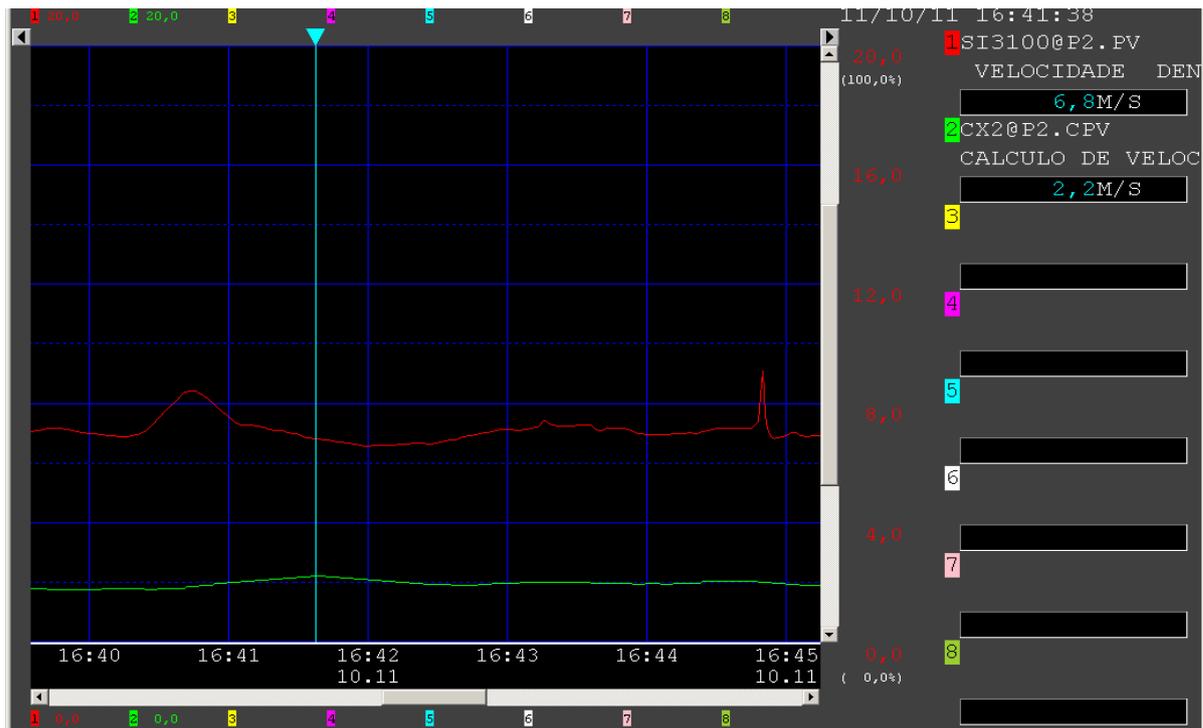


Figura 8.16 - Atraso de tempo e amplitude entre o modelos de velocidade e o Densflow

8.13 CONCLUSÕES DA MODELAGEM DO TRANSPORTE PNEUMÁTICO

A princípio, as demais variáveis de processo do vaso de injeção tais como pressão de injeção, de transporte e fluidização são irrelevantes para o alto-forno. Pode-se desprezar ou piorar o controle da pressão do vaso e da vazão de fluidização em prol de uma maior estabilidade da vazão de carvão pulverizado, ou seja, o desempenho destas malhas pode até piorar desde que seja comprovado o ganho na estabilidade da vazão de carvão na linha principal. O Alto-forno só “enxerga” a vazão de carvão pulverizado.

A tubulação principal de transporte pneumático de finos de carvão e nitrogênio obteve uma dilatação de 0,25% na sua área interna e a lança de injeção também obteve uma dilatação de 0,25% na sua área interna, tanto com a lança simples Schedule 160 quanto na lança dupla Schedule XXS, devido ao aumento de temperatura na tubulação. Com isso o aumento do diâmetro mostrou-se insignificante em relação a perda de velocidade do material na tubulação.

Os modelos desenvolvidos fornecem a relação sólido-gás, densidade de fluxo e linha, temperatura e velocidade das partículas e que são úteis na determinação dos estados do transporte pneumático. Os estados do transporte pneumático por sua vez são fundamentais para se evitar entupimentos nas lanças e nas tubulações em geral conforme orienta [70].

Os modelos dinâmicos do transporte pneumático são úteis e essenciais para ajuste, desempenho e monitoramento do transporte pneumático de carvão pulverizado em fase densa por nitrogênio pressurizado, evitando o **entupimento da linha principal de injeção e das lanças de injeção** com conseqüente redução de produção do alto-forno.

Este estudo foi fundamental na implantação da lança dupla de carvão. A tese especificou uma nova lança de injeção para ser usada na lança dupla. A nova lança foi definida por questões de padronização e existência do Schedule XXS e também para compensar a perda de carga causada pela bifurcação em “Y”, bem como a baixa velocidade o que leva ao entupimento das lanças.

Capítulo 9

Modelagem Dinâmica da Estação de Carvão

9.1 OBJETIVOS DO MODELO DINAMICO DA ESTAÇÃO DE INJEÇÃO

Neste capítulo deseja-se em particular modelar somente a fase de injeção do vaso visando obter as vazões do fluxo bifásico de carvão pulverizado e nitrogênio na linha principal, bem como uma saída pré-determinada para a válvula de controle de fluxo de carvão, ou válvula dosadora. No modelo dinâmico desenvolvido para o vaso e acordo com os conceitos de modelagem vistos em Pinheiro [59], Aguirre [60] e Luyben [61], as fases de pressurização e alívio não interessam, visto que o alvo principal da tese é a estabilidade da vazão de carvão pulverizado na linha principal. Esta estabilidade foi obtida não só por novos controladores, mas também por novas estratégias de controle lógica tais como: nova seqüência dos vasos, comportamento durante a troca dos vasos, e a implementação de novas estratégias e válvulas para as malhas de controle para a pressão e fluidização.

No trabalho de Johansson [22], a intenção, além do controle e estabilidade da vazão de carvão, era o controle da pressão de injeção e avaliação dos vazamentos. O comportamento dos vazamentos não é uma ciência exata sendo um fenômeno aleatório e caótico, e, portanto de modelagem impraticável, pois não segue uma lei clara de funcionamento. Nesta pesquisa e desenvolvimento obtém-se uma melhora da vazão de carvão com o auxílio de novas estratégias de controle lógico, a princípio, preservando-se os controladores PID disponíveis no SDCD.

Um ponto em comum entre este artigo e os trabalhos de Birk [9] é que a variável de processo importante é a vazão de carvão pulverizado na linha principal. Do ponto de vista do alto-forno, a princípio essa é a única variável de interesse. Existem outras secundárias, tais como a velocidade das partículas, umidade e a vazão de nitrogênio que entra na geração de gás do alto-forno, o que pode atrapalhar sua permeabilidade e rendimento, porém ainda irrelevantes em relação a constância da vazão de carvão.

A princípio, as demais variáveis de processo do vaso de injeção tais como pressão de injeção, de transporte e fluidização são irrelevantes para o alto-forno. A princípio, pode-se desprezar ou piorar o controle da pressão do vaso e da vazão de fluidização em prol de uma maior estabilidade da vazão de carvão pulverizado, ou seja, o desempenho destas malhas pode até piorar desde que haja ganho comprovado na estabilidade da vazão de carvão na linha principal. O alto-forno só “enxerga” a vazão de carvão pulverizado.

9.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DA MODELAGEM DINÂMICA

Os vasos de injeção de carvão pulverizado podem ser modelados como se fossem tanques pressurizados e o princípio da conservação da massa pode ser usado como descreve Thomas [75]. Porém, nem o vaso, nem as quatro válvulas de controle têm um comportamento linear de fácil modelagem como experimentado por Birk [12]. O vaso que se encontra na fase de injeção recebe vazão de nitrogênio pela linha de controle de pressão e pela linha de controle de vazão do anel de fluidização. Além disto, ele possui um peso de carvão inicial ganho na fase de carregamento e um volume de nitrogênio inicial ganho nas fases de pré-pressurização e pressurização rápida que serão negligenciados nesta modelagem devido ao interesse da modelagem somente para a fase de injeção.

O modelo (Figura 9.1) leva em consideração as novas fases de espera depressurizada e pré-pressurização dos ciclos da injeção que foram implementadas pela CSN. Além disto, as próprias melhorias da Claudius Peters mudaram o processo do vaso de injeção, a instrumentação e as estratégias das malhas de controle significativamente com o passar dos anos ao longo de várias plantas de PCI ao redor do Mundo desde 1997, ano da inauguração na CSN.

Isto pede que sejam considerados no modelo diversas variáveis novas, tais como o controle de vazão de fluidização do cone base do vaso de injeção, controle do set-point de pressão de injeção, e finalmente o controle do set-point de injeção.

Em complementação, foram adicionadas outras variáveis disponíveis do sistema de injeção para uma modelagem mais completa possível, tal como na listagem a seguir:

- a - Velocidade do carvão, densidade de fluxo e vazão na linha principal;
- b - Temperatura do carvão e do nitrogênio da rede de alimentação;
- c - Vazões de fluidização, transporte e pressão;
- d - Curva característica da válvula dosadora e demais válvulas de controle;
- e - Densidade do carvão e do nitrogênio;
- f - Perda de carga ocasionada pelo transporte pneumático na linha principal;
- g - Pressão de ar soprado do alto-forno.

As condições de contorno da modelagem e as variáveis descritas anteriormente não foram consideradas no modelo 2 x 2 de Birk [9], [10] e [11]. Além disto, não houve considerações sobre a vazão de transporte e sua influência na pressão diferencial do injetor.

Tudo isso torna necessário o desenvolvimento de um novo modelo para descrever o comportamento do vaso de injeção e poder inferir e deduzir os melhores algoritmos e estratégias de controle, tal como feito por Birk [8].

A Figura 9.1 a seguir ilustra o desenho esquemático novo do vaso de injeção atual da CSN, objeto de modelagem desta tese. A modelagem é feita durante a fase de injeção levando-se em consideração a queda de pressão da linha principal de injeção devido ao carvão e ao nitrogênio desde a saída do vaso até a lança de injeção de carvão.

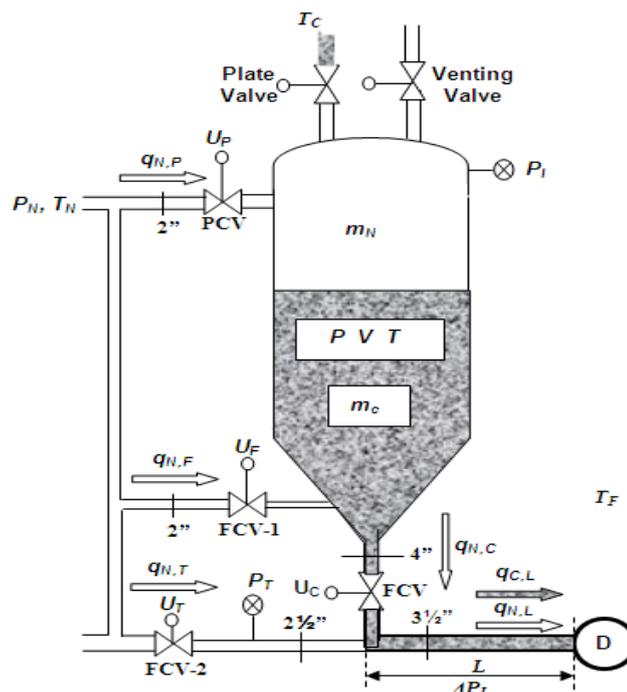


Figura 9.1 - Desenho esquemático do novo modelo do vaso de injeção

A Tabela 9.1 a seguir contém uma nomenclatura adicional a Tabela 8.1 usada na modelagem do transporte pneumático. Procurou-se preservar a mesma nomenclatura usada por [8], acrescentando as novas variáveis obtidas com o desenvolvimento da modelagem e inclusão das vazões de transporte e fluidização.

Tabela 9.1 - Nomenclatura da modelagem dinâmica da estação de carvão pulverizado		
Símbolo	Descrição	Detalhe
U_P	Sinal de controle para PCV	Válvula de controle de Pressão de injeção
U_F	Sinal de controle para FCV1	Válvula de controle de vazão de fluidização
U_C	Sinal de controle para FCV	Válvula dosadora de carvão pulverizado
U_T	Sinal de controle para FCV2	Válvula de controle de vazão de transporte
V	Volume interno de vaso de injeção	Constante em 25 m^3
V_N	Volume de nitrogênio	Peso de nitrogênio sobre sua densidade
V_C	Volume de carvão dentro do vaso	Peso de carvão sobre sua densidade
$p(t)$	Pressão dinâmica do vaso em bar	Pressão atual do vaso de injeção
$m(t)$	Massa dinâmica de carvão e nitrogênio no vaso em t , igual a W	Peso atual do vaso de injeção = W
$m_N(t)$	Peso atual e N_2 do vaso de injeção	Volume de N_2 vezes sua densidade = W_N
$m_C(t)$	Peso real de carvão dentro do vaso	Peso de carvão real dentro do vaso = W_C
$m_P(t)$	Vazão mássica de N_2 pela PCV	Vazão de N_2 estimada vezes sua densidade
$m_F(t)$	Vazão mássica de N_2 pela FCV	Vazão de N_2 medida vezes sua densidade
$q(t)$	Vazão de carvão na linha principal em t/h	Variável de interesse do controle principal
$n(t)$	Vazão de nitrogênio na linha principal em m^3/h nas CNTPs	Variável de interesse para o transporte pneumático

9.3 MODELAGENS INDIVIDUAIS DOS EQUIPAMENTOS DE CONTROLE

O controle de vazão de carvão e pressão dos vasos de injeção envolve a princípio dois acionadores. A válvula de controle de pressão (PCV) e a válvula de controle de vazão (FCV). A PCV é uma válvula padrão, enquanto a FCV é um projeto especial da Claudius Peters. Ambas as válvulas têm um controle de posição que foi bem definido nesta tese. A definição da forma de controle e funcionamento dos atuadores, especialmente os hidráulicos das válvulas dosadoras.

Pode-se assumir que o controle de posição tem um desempenho suficientemente rápido e preciso. Mais tarde o desempenho dessas malhas internas é considerado ser proporcional.

Como a FCV2 é uma válvula especial projetada pela Claudius Peters que não possuía nenhuma curva característica de vazão conhecida mesmo pelo fabricante. Esta tese levantou a curva característica da válvula dosadora localizada logo abaixo do vaso de injeção, cuja função é regular a vazão de carvão.

9.3.1 Sensores e a nova instrumentação dedicada

Como a planta toda é constituída de muitos processos que funcionam separados, em parte sem conhecimento dos outros processos, eles interferem um ao outro. Além disso, muitas partes da planta são mecanicamente acopladas, por exemplo, os vasos de injeção são acoplados sobre a linha de injeção de carvão, que resulta em erros na medição, que não podem ser negligenciados.

Por esse motivo, tem que se analisar que sinais são utilizáveis para identificação do processo e como serem obtidos. O processo tem essencialmente oito (8) sinais de entrada a saber:

- Pressão do vaso de injeção;
- Pressão na linha de nitrogênio;
- Peso do vaso de injeção de carvão;
- Pressão na linha de injeção de carvão.
- Vazão de nitrogênio de fluidização;
- Vazão de nitrogênio de transporte;
- Pressão e temperatura do nitrogênio de alimentação;
- Temperatura do carvão medida na saída do filtro de mangas.

Adicionalmente ao sistema original do fabricante, nesta tese foram incluídos:

- Pressão do transporte pneumático antes do distribuidor;
- Vazão, velocidade e densidade obtidas pelo Densflow.

Estas novas variáveis são essenciais para ajuste do transporte pneumático que tem grande influência sobre a variabilidade da vazão de carvão pulverizado.

A interação entre as variáveis geradas pela modelagem de transporte pneumático do capítulo anterior com as variáveis dinâmicas usadas no controle do processo propriamente ditas, serão visitas neste capítulo.

9.3.2 O controle de vazão de nitrogênio de fluidização do cone base do vaso

A Figura 9.2 ilustra o diagrama em blocos da malha de controle de vazão de nitrogênio de fluidização no cone base do vaso de injeção modelada e identificada em S através do método de resposta ao degrau de Zigher e Nichols [62]:

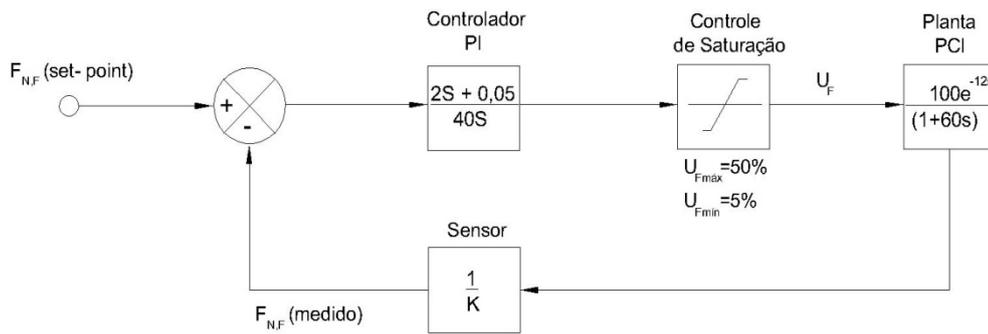


Figura 9.2 - Diagrama em blocos da malha de controle de vazão de fluidização modelada em S

Onde,

$U_{Fmín} = 5\%$, pois a medição de vazão se apaga para valores menores;

$U_{Fmáx} = 60\%$, pois a máxima vazão de fluidização necessária para o transporte pneumático é atendido na maior vazão de carvão 50 t/h.

9.3.3 O controle de vazão de nitrogênio de transporte da linha principal

A Figura 9.3 ilustra o diagrama em blocos das malhas de controle de vazão de nitrogênio de arraste ou transporte injetado na linha principal de transporte pneumático:

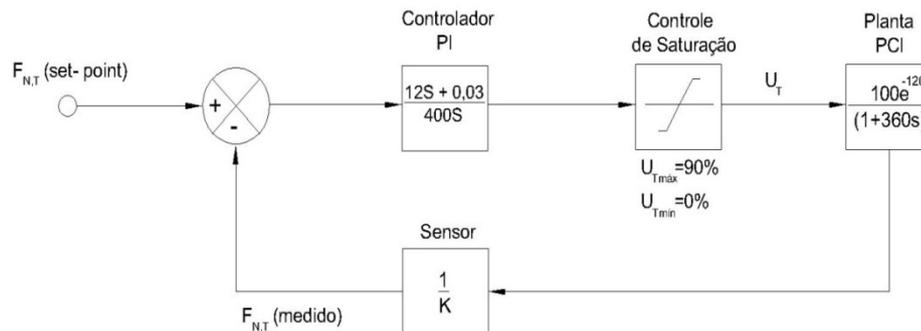


Figura 9.3 - Diagrama em blocos das malhas de controle de vazão de nitrogênio de transporte

O controle de saturação que limita a variável manipulada do controlador foi ajustado de acordo com as seguintes razões:

$U_{Tmín} = 0\%$, pois a válvula é do tipo falha abre. Portanto em 0% obtém-se a maior vazão de nitrogênio de arraste usado principalmente para refrigerar os mangotes de injeção de carvão em caso de queda de injeção;

$U_{Tmáx} = 90\%$, pois para valores maiores a medição de vazão falha e ocorre descontrole e parada de injeção.

9.3.4 O controle de pressão do vaso de injeção

O controlador de pressão está localizado no SDCD e fisicamente próximo aos vasos de injeção de carvão. O tempo do ciclo para a malha de pressão é de 10 s. O controlador utilizado é um controlador PI quase contínuo com um tempo de integração de 5 s e um ganho de 5. O ganho aumentou com um ganho como resultado de recomendações dos pré-estudos realizados pela tese. Foi mostrado anteriormente que um ganho maior de 3, aumenta o desempenho do controlador. Os parâmetros PID dos principais controladores da estação de injeção foram implementados nas telas gráficas do processo para o levantamento de dados.

A Figura 9.4 ilustra o diagrama da malha de controle de pressão do vaso:

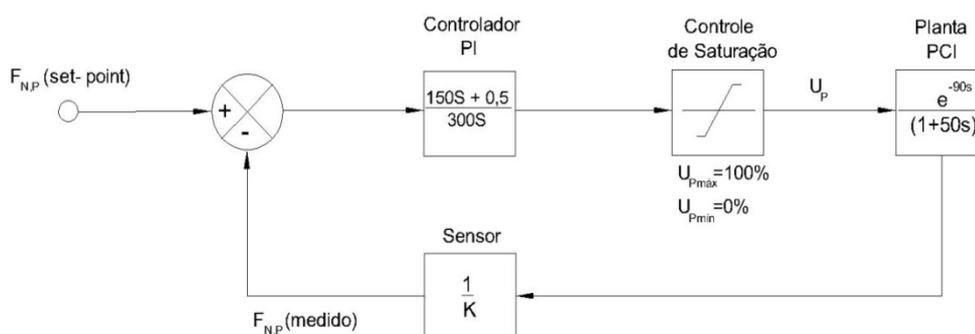


Figura 9.4 - Diagrama da malha de controle de pressão do vaso

Não há limites de saturação para a variável manipulada do controlador de pressão, permitindo que sua válvula opere em toda a faixa possível do controle. Portanto:

$U_{p,mín} = 0\%$, menor valor do posicionador da válvula;

$U_{p,máx} = 100\%$, maior valor possível.

9.3.5 O controle da vazão mássica na linha principal

Como a vazão mássica não pode ser medida, a unidade de controle utiliza a perda mássica do vaso de injeção de carvão durante a fase de injeção como sinal de entrada. Este é o estado da arte e era a mesma técnica utilizada na CSN. Agora, tem-se também o medidor de vazão mássica na linha principal para aferir e comparar os modelos propostos para o controle avançado. A perda mássica é então derivada em primeira ordem é utilizada para se obter a vazão instantânea de carvão.

O sinal resultante é então passado por um filtro passa-baixas (média móvel) e limitado a um desvio máximo com referência ao “set-point” para reduzir o ruído que foi intensificado por causa da diferenciação. Um filtro de limitação da derivada pelo desvio máximo de “set-point” foi implantada de forma gradual e faz parte da tese.

O controlador é do tipo PI contínuo com constante de integração de 20 repetições/minuto e um ganho proporcional de 75. Este controlador era PID originalmente, também como parâmetro D zerado, e foi aprimorado para o tipo PI-hold. Este tipo de PID com algoritmo diferente está disponível no SDCD Yokogawa, e são mais adequadas as correções do processo em vista de seu tempo morto de controle e dos resultados práticos obtidos pelos gráficos dos analisadores de variação.

A Figura 9.5 ilustra a malha de controle de vazão identificada em S.

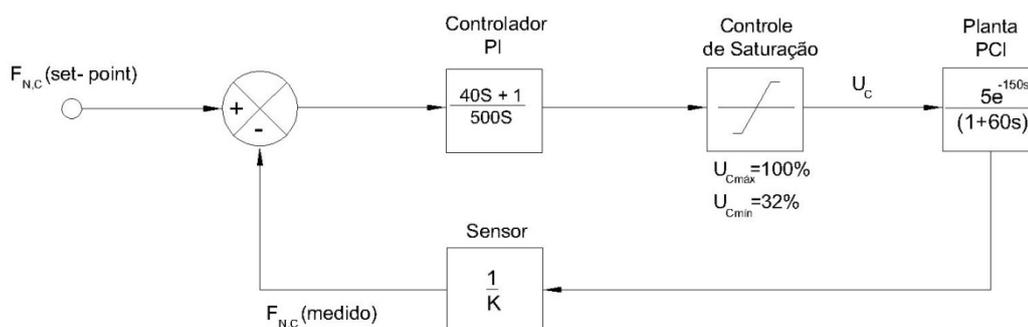


Figura 9.5 - Diagrama em S da malha de vazão de carvão

Onde,

$U_{Cmáx} = 100\%$, para garantir a máxima capacidade de injeção durante toda a faixa de resposta linear da válvula dosadora;

$U_{Cmín} = 32\%$, valor mínimo que garante uma curva de resposta com característica linear para a válvula dosadora durante a fase de injeção. Fora da fase de injeção, $U_{Cmín} = 0\%$ para garantir o fechamento da válvula dosadora e a vedação do vaso.

Pode-se ver que os limites de saturação para a variável manipulada do controlador de vazão de carvão permitindo que sua válvula opere somente na faixa linear de controle, ou seja, de 32 a 100% conforme curva da válvula dosadora.

Os controladores de vazão de carvão são sintonizados para cada vaso de injeção. Em geral os parâmetros PI são iguais, porém para alguns vasos os parâmetros são ligeiramente modificados em função dos resultados obtidos. Esta operação é mais intuitiva do que comprovada. A tese mostra como formar dados estatísticos deste processo estocástico para efetuar a verificação e validação das novas filosofias e algoritmos de controle de processo para as estações de injeção de carvão pulverizado.

Além disso, a unidade de controle possui uma compensação do valor do “set-point”, para compensar os erros na vazão mássica computada. A perda mássica do vaso de injeção de carvão real é comparada com a perda mássica ideal. Através dessa diferença um fator de compensação é computado. Este fator é usado como ajuste fino do “set-point” de vazão de injeção, atuando entre ± 200 e ± 1000 kg e constitui uma dos desenvolvimentos efetuados por esta tese de doutorado.

Uma examinada no desvio da vazão mássica mostra que controlador vigente não consegue zerar o erro do controle. Isso também é sustentado, quando se observa o desvio da perda mássica através da perda mássica ideal do vaso de injeção de carvão.

9.4 MODELO FÍSICO NÃO-LINEAR DE QUATRO DIMENSÕES

Com a finalidade de encontrar um modelo físico não-linear de quatro dimensões para fornecer bases de um novo controlador de vazão de carvão é necessário que se tenha um modelo dinâmico do processo contemplando as variáveis do transporte pneumático. Nesse item o modelo físico não-linear do processo na fase de injeção junto com os modelos dinâmicos do transporte pneumático do capítulo anterior.

De acordo com a Figura 9.6, o modelo físico do vaso de injeção de carvão é o processo comum de tanque pressurizado.

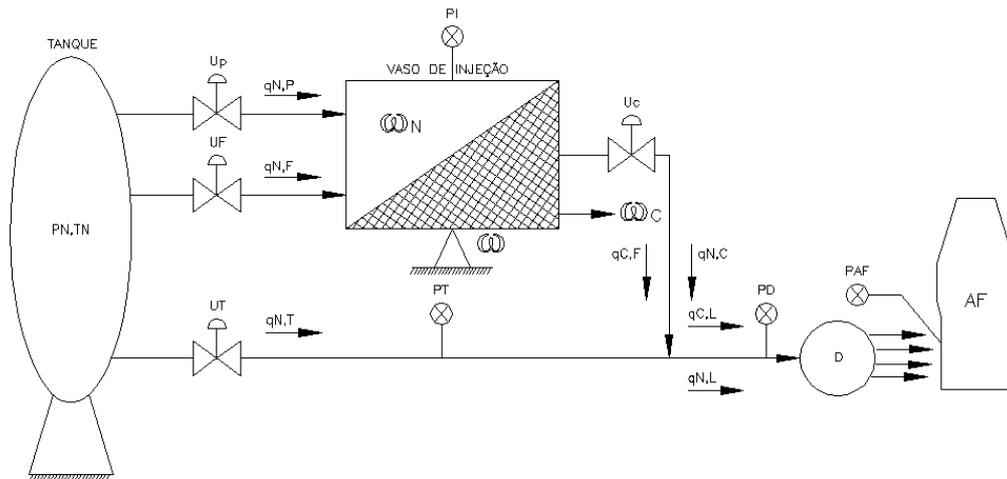


Figura 9.6 - União do Modelo dinâmico não-linear como os modelos do transporte pneumático

Os sinais de entrada no modelo dinâmico são: U_p , U_F , U_C e U_n . As saídas são: pressão no vaso p , a massa ou peso de carvão atual no vaso m , a vazão de carvão de saída, q e a vazão de nitrogênio de transporte final na linha principal após o injetor, n .

As mudanças de temperaturas do nitrogênio não foram consideradas no modelo dinâmico desenvolvido por [8], de modo que naquele trabalho, a temperatura final T_F foi considerada constante. Neste novo modelo avançado e mais completo, as temperaturas do carvão e do nitrogênio não são constantes e sim variáveis de entrada do modelo.

Para isso, uma temperatura resultante da mistura de nitrogênio e carvão tem que ser calculada e inserida como variável de entrada novíssima do modelo que passa a ter a dimensão 4x4, contemplando a vazão de nitrogênio de fluidização e na linha principal do transporte pneumático após o injetor da válvula dosadora.

A elevada temperatura do carvão (80°C) e a razão das massas (o carvão é cerca de 500 vezes mais denso do que nitrogênio) fazem com que a densidade do nitrogênio a 25°C diminua após sua entrada no vaso, devido a expansão dos gases.

Em geral, as vazões mássicas através das três válvulas de controle no caso do PCI da CSN podem ser escritas pelas Equações (9.1), (9.2) e (9.3) a seguir:

$$\dot{m}_p = k_{N1} \cdot g_{PCV_p}(p_N, p_I) \cdot g_{PCV_u}(u_p) \tag{9.1}$$

$$\dot{m}_F = k_{N2} \cdot g_{FCV1_p}(p_N, p_I) \cdot g_{FCV1_u}(u_F) \tag{9.2}$$

$$\dot{m}_C = k_C \cdot g_{FCV2}(p_I, p_T) \cdot g_{FCV2_u}(u_C) \tag{9.3}$$

Onde:

$$g_{PCV_p}(p_N, p_I) \cdot g_{PCV_u}(u_p)$$

São as funções não-lineares da válvula de controle de pressão, PCV;

$$g_{FCV1_p}(p_N, p_I) \cdot g_{FCV1_u}(u_F)$$

São as funções não-lineares da válvula de controle de vazão de fluidização, FCV1;

$$g_{FCV}(p_I, p_T) \cdot g_{FCV_u}(u_C)$$

São as funções não-lineares da válvula dosadora de controle de vazão de carvão, FCV.

Estas funções dependem do projeto das válvulas. Porém, como detalhe exclusivo da estação de injeção do PCI da CSN, tem-se a igualdade (9.4) a seguir:

$$g_{PCV_p}(p_N, p_I) = g_{FCV1_p}(p_N, p_I) \quad (9.4)$$

Portanto, para o caso desta tese, em especial da estação de injeção da CSN, é possível inferir a vazão de nitrogênio que passa pela válvula de controle de pressão, PCV, e alimenta o topo do vaso de injeção. Normalmente, os projetos das estações de injeção da Claudius Peters não possuem uma medição de vazão pela linha de controle de pressão do vaso de injeção.

Esta vazão se soma a vazão de fluidização no cone base do vaso que também influencia na pressão final do vaso de injeção e deve ser considerada neste novo modelo mais avançado e completo sendo mais adequado para as atuais configurações de estação de injeção de carvão pulverizado da Claudius Peters (de acordo com o novo projeto descrito em [4]).

Como não é somente o carvão pulverizado que não passa pela FCV, há também um escoamento de nitrogênio. Uma segunda vazão de nitrogênio deve ser definida. No modelo desenvolvido por [8], assumiu-se que o valor dessa vazão deve ser zero. Além disso, a vazão mássica do carvão resultante da variação do peso carvão pulverizado é negligenciada no modelo principal. Neste artigo considera-se este o principal item de controle do processo.

O balanço mássico e sua derivação no tempo resultam na Equação (9.5):

$$m = m_N + m_C = m_P + m_F + m_C \quad (9.5)$$

Derivando membro a membro, obtém-se a Expressão (9.6) a seguir:

$$\dot{m} = \dot{m}_P + \dot{m}_F + \dot{m}_C \quad (9.6)$$

Monta-se um Sistema de duas equações a duas incógnitas (9.7) em tempo real para a determinação do peso de carvão e do peso de N₂ em função da pressão do vaso e de seu peso atual do vaso, m(t):

$$\begin{cases} m = m_N + m_C \\ V = V_N + V_C \end{cases} \quad (9.7)$$

O peso atual real de carvão pode ser determinado pela Equação (9.8) conhecendo-se o peso atual e a pressão do vaso.

$$m_C = \frac{mp_C - 25\rho_C\rho_{NV}}{\rho_C - \rho_{NV}} \quad (9.8)$$

O peso de nitrogênio é obtido pela solução do sistema (9.7) e os resultados dos modelos de massa e volume para os vasos 1 e 2 da injeção do AF2 em cada coluna são apresentados nas colunas da Figura 9.7:

PI	Pressão de Injeção Medida	Variável de Processo Medida Pelo Transmissor	10,57	6,57	bar
m(t)	Massa Total Dentro Vaso	Massa de Carvão + Massa de Nitrogênio	12629	1775	kg
VN	Volume N2 dentro Vaso	Volume de Nitrogênio fora da CNTP	4,37	22,46	m ³
VC	Volume Carvão dentro Vaso	Volume de Carvão Atual	20,63	2,54	m ³
mC	Massa Carvão dentro Vaso	Peso Carvão Carregado no Vaso	12586	1551	kg
mN	Massa N2 dentro Vaso	Peso N2 dentro Vaso	43,52	223,78	kg

Figura 9.7 - Resultados dos modelos de massa e volume para os vasos 1 e 2 de injeção do AF2

Para um gás ideal, tem-se a Expressão (9.9) a seguir:

$$p \cdot V_N = (m_P + m_F)R_N T \quad (9.9)$$

Assumindo que a temperatura interna do vaso T não varia no tempo,

$\frac{\partial T}{\partial t} = 0$. A derivada do balanço mássico no tempo resulta na Equação (9.10):

$$p \cdot \dot{V}_N + p \cdot \dot{V}_N = (\dot{m}_P + \dot{m}_F)R_N T \quad (9.10)$$

Introduzindo o balanço de volume constante do vaso $V=25 \text{ m}^3$ e sua derivada, tem-se a Equação (9.11) a seguir:

$$V_N = V - V_C = V - \frac{m_C}{\rho_C} \quad (9.11)$$

Como o volume interno do vaso é constante, a Equação (9.11) torna-se a Equação (9.12), onde a derivada do volume de N_2 é proporcional a vazão de carvão:

$$\dot{V}_N = -\frac{\dot{m}_C}{\rho_C} \quad (9.12)$$

A Equação (9.12) ilustra que a perda de volume ou massa de carvão no tempo (vazão de carvão na linha principal) é igual à vazão de entrada de nitrogênio no vaso pela controladora de pressão PCV somada com a vazão de fluidização através da válvula de controle FCV1, de acordo com os conceitos do capítulo 6.

Para a taxa de carvão na linha, o valor pode ser obtido pela derivada do peso do vaso no tempo, assumindo que a reposição de nitrogênio seja constante e que não há perda de nitrogênio pelo vaso. Assim, o nitrogênio que entra no vaso mantém sua pressão constante e, portanto, o volume de nitrogênio no interior do vaso de injeção permanece constante, conforme a Equação (9.13):

$$q(t) = \frac{dm_C(t)}{dt}, \text{ ou seja, } q(t) = q_{C,L} = \dot{m}_C \quad (9.13)$$

A Equação (9.10) pode ser então reescrita como na Equação (9.14):

$$\dot{p} \cdot V_N = (\dot{m}_P + \dot{m}_F)R_N T - p \cdot \dot{V}_N \quad (9.14)$$

Isolando-se a variável de interesse, tem-se a Equação (9.15):

$$\dot{p} = \frac{(\dot{m}_P + \dot{m}_F)R_N T - p \cdot \dot{V}_N}{V_N} \quad (9.15)$$

E que finalmente, a derivada da pressão no tempo pode ser escrita na forma conforme a Equação (9.16):

$$\dot{p} = \frac{R_N \cdot T \cdot (k_P \cdot g_{PCV_p}(P_N, P_I) \cdot g_{PCV_v} + k_F \cdot g_{FCV_l}(P_N, P_I) \cdot g_{FCV_v}) - p \cdot \frac{k_C}{\rho_C} \cdot g_{FCV_p}(P_I, P_T) \cdot g_{FCV_v}(u_C)}{V - \frac{m_C}{\rho_C}} \quad (9.16)$$

Como as funções da válvula $gPCVp$, $gPCVu$ e $gFCVp$, $gFCVu$ são desconhecidas e não podem ser tiradas das planilhas existentes. Essas funções devem ser identificadas através do processo de dados. Além disso, os fatores kC , kP , kF e kN têm que ser determinados através do processo de aquisição de dados.

As matrizes de representação do modelo dinâmico em equações de estados dos parâmetros e variáveis dinâmicas do transporte pneumáticas obtidas através de equações do estado físico são descritas pelas matrizes a seguir:

As matrizes de excitação e de estado são descritas na Equação matricial (9.17) abaixo:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\dot{m}_p R_N T - p \dot{V}_N}{V_N} & \frac{\dot{m}_F R_N T - p \dot{V}_N}{V_N} & 0 & 0 \\ m_p & m_F & m_C & 0 \\ 0 & 0 & \dot{m}_C & 0 \\ F_{N,p} & F_{N,F} & \rho_{NV} \frac{-\dot{m}_C}{\rho_C} & F_{N,T} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \times [U_P \quad U_F \quad U_C \quad U_T] \quad (9.17)$$

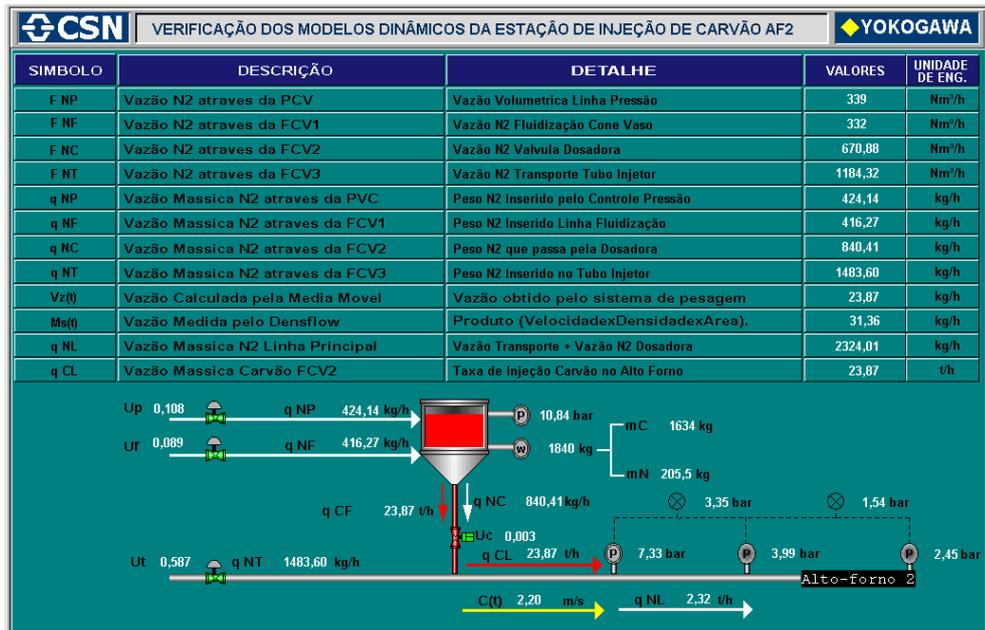
A matriz de saída (9.18) representa as principais variáveis do transporte pneumático como resultado da modelagem dinâmica do transporte pneumático:

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \end{bmatrix} = [1 \quad 1 \quad 1 \quad 1] \times \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p(t) \\ m(t) \\ q(t) \\ n(t) \end{bmatrix} \quad (9.18)$$

A matriz de erro (9.19) é efetuada no SDCD em tempo real e contém a comparação tempo a tempo das medidas efetuadas e os resultados dos modelos para validação e interpretação dos dados obtidos.

$$\varepsilon = [\varepsilon_5(t) \quad \varepsilon_6(t) \quad \varepsilon_7(t) \quad \varepsilon_8(t)]^T \quad (9.19)$$

A Figura 9.8 ilustra a união dos resultados dos modelos do transporte pneumático sendo considerados no balanço de volume e massa do modelo dinâmico com as principais variáveis de controle do vaso de injeção. Esta abordagem mais completa para o modelo dinâmico da estação de injeção de carvão pulverizado não foi encontrado em nenhuma literatura de controle do gênero pesquisada.



Figuras 9.8 - Variáveis do Transporte Pneumático e o Balanço Dinâmico de Volume e Massa

9.5 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DESENVOLVIDO

Por causa da não linearidade no modelo físico, uma identificação de um modelo linear que aproxime o modelo não linear é aplicada. Neste item, é mostrado que um modelo linear originado com dados de entrada/saída funciona suficientemente bem para a fase de injeção. Um modelo já existente para a planta é validado usando novos dados. Para identificação a caixa de ferramenta de identificação para MatLab é utilizada.

9.5.1 Dados de medição

Para identificar a planta, dados de entrada/saída são necessários. Com este propósito, são inseridos oito sinais na modelagem:

- Pressão do vaso no tempo;
- Massa ou peso do vaso no tempo;
- Vazão de N₂ de transporte;
- Vazão de N₂ de fluidização;
- Valor da variável manipulada da PCV;
- Valor da variável manipulada da FCV;
- Valor da variável manipulada da FCV1;
- Valor da variável manipulada da FCV3.

Por causa da não linearidade da PCV, FCV1 e da FCV2 descrita acima, os sinais de entrada são convertidos. Desse modo, a não-linearidade torna-se parte da planta e, portanto do modelo.

Como já estudado, a curva da válvula dosadora apresenta uma progressão linear da área a entre 32 e 100% de abertura. Porém, a não-linearidade é introduzida pela extração da raiz quadrada da diferença de pressão e não somente pela área.

9.5.2 Modelo para a pressão dentro do vaso

Para validação do modelo em Z da pressão no interior do vaso, a equação diferenças foi inserida em cálculo no SDCD e comparada com a pressão de injeção real do processo. O modelo em Z identificado para o controle de pressão de injeção do vaso tem a seguinte Equação (9.20):

$$p(t) = -0,0106 \cdot \frac{1 - 1,0566Z^{-1}}{1 - 0,8858Z^{-1} - 0,01114Z^{-2}} \cdot u_p(t) \quad (9.20)$$

Onde:

$p(t)$: Pressão no interior do vaso de injeção com o passar do tempo;

$U_p(t)$: Variável manipulada do controlador de pressão de injeção cujo elemento final de controle é a válvula PCV;

Z^{-1} : Operador da transformada Z.

9.5.3 Modelo para a massa dentro do vaso

Para o projeto de dois sistemas de controle em malha fechada separados e simples, (SISO), tem-se um controlando a pressão e outro controlando a vazão mássica. O modelo para a massa no interior pode ser escolhendo-se como entrada o comando para FCV e como saída, a massa do vaso. O modelo resultante em Z tem a seguinte Equação (9.21) a seguir:

$$m(t) = \left\{ -0,0106 \cdot \frac{1 - 1,0566Z^{-1}}{1 - 0,8858Z^{-1} - 0,01114Z^{-2}} \cdot u_p(t) + u_f(t) \right\} - \frac{-0,00101 \times Z^{-1}}{1 - 0,99994 \times Z^{-1}} \cdot u_c(t) \quad (9.21)$$

Onde:

$m(t)$: Massa de carvão dentro do vaso com o passar do tempo;

$U_f(t)$: Variável manipulada do controlador de vazão de fluidização cujo elemento final de controle é a válvula FCV1;

9.5.4 Modelo para a vazão de carvão na linha principal de injeção

O modelo em Z para a vazão de carvão através da válvula dosadora adquirido, tal como ilustra a Equação (9.22).

$$q(t) = \frac{-0,00099 \times Z^{-1}}{1 - 0,99983 \times Z^{-1}} \cdot u_c(t) \quad (9.22)$$

Onde:

$q(t)$: vazão de carvão instantânea na linha principal.

$U_c(t)$: Variável manipulada do controlador de vazão de carvão cujo elemento final de controle é a válvula dosadora;

Obviamente o modelo é de primeira ordem e tem um pólo próximo a margem da estabilidade. Isto parece ser logicamente correto valido desde o conhecimento da planta a massa do vaso é a integral da vazão da massa do vaso de injeção de carvão. Isto conduz ao resultado de que a FCV junto com o controlador de posição pode ter um comportamento proporcional. Assumindo a estrutura do modelo como sendo complexa, esta consideração produz um melhor resultado de identificação.

9.5.5 Modelo para a vazão de nitrogênio de transporte

Para validação do modelo em Z da vazão de nitrogênio de transporte inserida no tubo injetor da linha principal e transporte pneumático, a equação diferenças foi inserida em cálculo no SDCCD e comparada com a vazão de transporte real do processo. O modelo em Z identificado para o controle de pressão de injeção do vaso tem a seguinte Equação (9.23):

$$n(t) = -0,03 \cdot \frac{1 - 1,086Z^{-1}}{1 - 0,989Z^{-1} - 0,0232Z^{-2}} \cdot u_T(t) + \{-0,0106 \cdot \frac{1 - 1,0566Z^{-1}}{1 - 0,8858Z^{-1} - 0,01114Z^{-2}} \cdot u_P(t) + u_F(t)\} \quad (9.23)$$

$n(t)$: Vazão de nitrogênio de transporte inserida na linha principal;

$U_T(t)$: Variável manipulada do controlador de vazão de transporte cujo elemento final de controle é a válvula FCV2.

9.6 MODELO MIMO EM Z DESENVOLVIDO NA CSN

Para se ter uma estimativa paramétrica do modelo, tem-se que escolher uma estrutura de modelo e sua ordem. Como o modelo procurado tem quatro entradas e saídas e um método mínimo com base quadrada é usado a princípio, a estrutura do modelo para o caso MIMO é apresentada agora.

O modelo dinâmico MIMO em Z desenvolvido no SDCCD é validada em tempo real no próprio SDCCD por uma matriz de erro $\varepsilon(t)$.

A Figura 9.9 ilustra o método utilizado que contém a comparação tempo a tempo das medidas efetuadas na planta pela instrumentação com o resultado das equações a diferenças dos modelos para validação e interpretação dos dados obtidos.

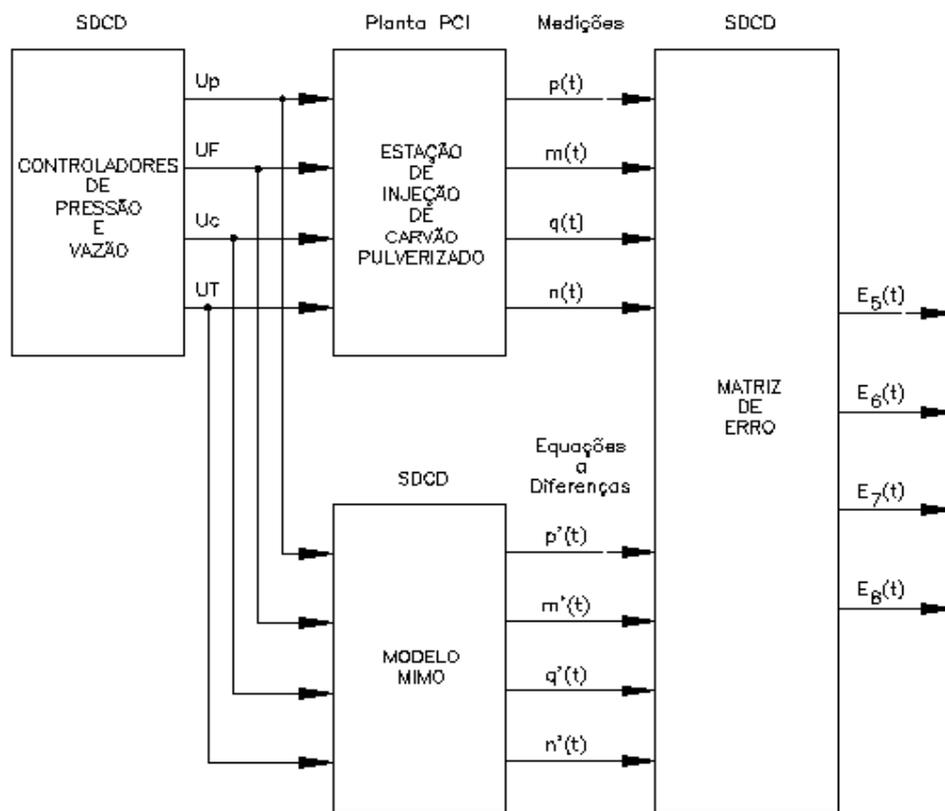


Figura 9.9 - Método para validação dos modelos dinâmicos não-lineares da estação de injeção

O modelo de espaço de estado 4x4 não-linear para o processo de injeção é definido selecionando:

$u = [u_p, u_f, u_c, u_n]^T$: como vetor de entrada;

$\dot{x} = [\dot{p}, \dot{m}, \dot{q}, \dot{n}]^T$: como vetor do estado;

$y = [p, m, q, n]^T$: como vetor de saída.

Os valores das entradas, espaço de estados, saídas e da matriz de erro dos modelos são definidos pelas matrizes 4X4 a seguir:

$$u(t) = \begin{bmatrix} u_p(t) \\ u_f(t) \\ u_c(t) \\ u_T(t) \end{bmatrix} \quad y(t) = \begin{bmatrix} p(t) \\ m(t) \\ q(t) \\ n(t) \end{bmatrix} \quad e \quad \varepsilon(t) = \begin{bmatrix} \varepsilon_5(t) \\ \varepsilon_6(t) \\ \varepsilon_7(t) \\ \varepsilon_8(t) \end{bmatrix}$$

Conforme [58], o processo para o modelo ARX resulta na Equação (9.24):

$$A(Z) \cdot y(t) = B(Z) \cdot u(t) + \varepsilon(t) \tag{9.24}$$

As matrizes são (9.25) e (9.26):

$$A(Z) = \begin{bmatrix} 1+a_{11}Z+\dots+a_{1na}Z^{na} & a_{12}Z+\dots+a_{12na}Z^{na} & a_{13}Z+\dots+a_{13na}Z^{na} & a_{14}Z+\dots+a_{14na}Z^{na} \\ a_{21}Z+\dots+a_{21na}Z^{na} & 1+a_{22}Z+\dots+a_{22na}Z^{na} & a_{23}Z+\dots+a_{23na}Z^{na} & a_{24}Z+\dots+a_{24na}Z^{na} \\ a_{31}Z+\dots+a_{31na}Z^{na} & a_{32}Z+\dots+a_{32na}Z^{na} & 1+a_{33}Z+\dots+a_{33na}Z^{na} & a_{34}Z+\dots+a_{34na}Z^{na} \\ a_{41}Z+\dots+a_{41na}Z^{na} & a_{42}Z+\dots+a_{42na}Z^{na} & a_{43}Z+\dots+a_{43na}Z^{na} & 1+a_{44}Z+\dots+a_{44na}Z^{na} \end{bmatrix} \quad (9.25)$$

$$B(Z) = \begin{bmatrix} b_{11}Z+\dots+b_{1nb}Z^{nb} & b_{12}Z+\dots+b_{12nb}Z^{nb} & b_{13}Z+\dots+b_{13nb}Z^{nb} & b_{14}Z+\dots+b_{14nb}Z^{nb} \\ b_{21}Z+\dots+b_{21nb}Z^{nb} & b_{22}Z+\dots+b_{22nb}Z^{nb} & b_{23}Z+\dots+b_{23nb}Z^{nb} & b_{24}Z+\dots+b_{24nb}Z^{nb} \\ b_{31}Z+\dots+b_{31nb}Z^{nb} & b_{32}Z+\dots+b_{32nb}Z^{nb} & b_{33}Z+\dots+b_{33nb}Z^{nb} & b_{34}Z+\dots+b_{34nb}Z^{nb} \\ b_{41}Z+\dots+b_{41nb}Z^{nb} & b_{42}Z+\dots+b_{42nb}Z^{nb} & b_{43}Z+\dots+b_{43nb}Z^{nb} & b_{44}Z+\dots+b_{44nb}Z^{nb} \end{bmatrix} \quad (9.26)$$

A ordem do modelo é definida pelos parâmetros **na** e **nb**, que tem que ser determinada antecipadamente. Isto significa que os trinta e dois polinômios têm que ser calculados. Estes polinômios descrevem oito processos ARX independentes.

A desvantagem da estrutura deste modelo para o caso MIMO é que todos os polinômios em $A(Z)$ e os em $B(Z)$ têm a mesma ordem. Se as supressões pólo-zero no modelo ARX identificado aparecerem, a ordem de desse processo é selecionado para alto. Uma ordem de redução do modelo é possível.

Em [59], o método dos mínimos quadrados é aplicado ao problema de cálculo de parâmetro do processo ARX SISO. As equações podem ser reescritas para uma realização MIMO, usando-se um modelo ARX. A Equação (9.24) torna-se então a Equação (9.27) a seguir:

$$y(t) = \varphi(t)^T \theta + \varepsilon(t) \quad (9.27)$$

Inserindo o vetor $\varphi(t)$ obtêm-se as Equações (9.28) e a matriz Θ (9.29):

$$\varphi(t)^T = [-y^T(t-1)\dots -y^T(t-na)u^T(t-1)\dots u^T(t-nb)] \quad (9.28)$$

$$\Theta = \begin{bmatrix} (a_{11}, a_{12})_1 \dots (a_{11}, a_{12})_{na} & (b_{11}, b_{12})_1 \dots (b_{11}, b_{12})_{nb} \\ (a_{21}, a_{22})_1 \dots (a_{21}, a_{22})_{na} & (b_{21}, b_{22})_1 \dots (b_{21}, b_{22})_{nb} \\ (a_{31}, a_{32})_1 \dots (a_{31}, a_{32})_{na} & (b_{31}, b_{32})_1 \dots (b_{31}, b_{32})_{nb} \\ (a_{41}, a_{42})_1 \dots (a_{41}, a_{42})_{na} & (b_{41}, b_{42})_1 \dots (b_{41}, b_{42})_{nb} \end{bmatrix} \quad (9.29)$$

O erro quadrático médio é definido pela Equação (9.30):

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varepsilon^2(t) \quad (9.30)$$

A matriz Θ do parâmetro calculado que minimiza $\bar{\varepsilon}$ pode ser computado conforme a Equação (9.31):

$$\hat{\Theta} = \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)\varphi(t)^T \right]^{-1} \times \left[\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \varphi(t)y(t) \right] \quad (9.31)$$

Para resolver este problema, já está implementado na caixa de ferramenta de identificação do Matlab (software para um tratamento matemático). Os dados medidos pelo SDCD foram exportados para o Matlab com o auxílio de planilhas do Excel com as variáveis de interesse ao longo do tempo, onde os conjuntos de validação e identificação existentes são utilizados separadamente.

Como a ordem do modelo tem que ser definida para o algoritmo, a escolha $\mathbf{na} = 4$, $\mathbf{nb} = 4$ parece ser apropriado para o primeiro teste. Esta escolha é baseada na ordem do modelo existente. Foram feitas diversas identificações variando os parâmetros \mathbf{na} , e \mathbf{nb} . A validação de cada do modelo prova que a primeira escolha com $\mathbf{na} = 4$, $\mathbf{nb} = 4$ tem melhor desempenho.

9.7 RESULTADOS DO MODELO MIMO

O desenvolvimento prático e os s resultado do modelo MIMO na forma discreta usando-se transformada Z implantado no SDCD com equações a diferença é descrito a seguir.

Para a modelagem discreta em Z, têm-se as Equações matriciais (9.32) e (9.33) para as equações a diferença discretas no tempo de acordo com [59] e [82]:

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (9.32)$$

$$x(k) = Cx(k) + Du(k) \quad (9.33)$$

Onde:

k = instante de amostra da variável discreta;

$k+1=k+\Delta T$ = instante de amostra da variável discreta;

ΔT =Intervalo de amostragem discreta do controlador.

Com:

$$A = \begin{bmatrix} 0,97775 & 0,00025 & 0,00025 & 0,0025 \\ -0,00225 & 0,00025 & 0,977 & 0,0025 \\ 0 & 0,00025 & 0,003 & 0,095 \\ 0 & 0 & 0 & 0,025 \end{bmatrix} \quad B = \begin{bmatrix} 0,97775 & 0,00025 & 0,00025 & 0,0025 \\ -0,00225 & 0,00025 & 0,977 & 0,0025 \\ 0 & 0,00025 & 0,003 & 0,095 \\ 0 & 0 & 0 & 0,025 \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad D = [\emptyset]$$

A identificação do modelo MIMO em Z usa-se as seguintes variáveis:

X_1 : pressão do vaso;

X_2 : massa (peso) do vaso;

X_3 : vazão de carvão na linha principal;

X_4 : vazão de nitrogênio na linha principal.

Finalmente, as Equações as diferenças (9.34), (9.35), (9.36) e (9.37) foram configuradas no SDCD para representar o processo dinamicamente de modo discreto:

$$X_1(k+1) = 0,9995 X_1(k) + 0,001 U_P(k) + 0,0005 U_F(k) \quad (9.35)$$

$$X_2(k+1) = 0,979 X_1(k) + 0,21 X_2(k) + 0,009 U_P(k) + 0,009 U_F(k) - 0,0108 U_C(k) \quad (9.35)$$

$$X_3(k+1) = 0,01 X_2(k) + 0,9995 X_3(k) - 0,00215 U_C(k) \quad (9.36)$$

$$X_4(k+1) = 0,001 X_1(k) + 0,0005 U_P(k) + 0,0005 U_F(k) + 0,002 X_3(k) + 0,8992 X_4(k) - 0,100 U_T(k) \quad (9.37)$$

9.8 CONCLUSÕES DA MODELAGEM DINÂMICA

A dissertação de mestrado [9] e os artigos correlacionados [10] e [11] que foram analisados forneceram a base para elaboração de um modelo mais completo para o controle da vazão de injeção de carvão pulverizado. A análise e simulação de sistemas dinâmicos baseado em [12] está direcionado para a interpretação, modelagem e simulação do comportamento das variáveis de processos no tempo.

As ferramentas do controle estatístico do processo são de fundamental importância para análise de processo que envolve partes determinísticas aliadas a resultados estocásticos que devem ser considerados para a análise do desempenho do controle do processo, tal como aborda em [18]. O Controle estatístico de processo fornece parâmetros para se analisar a variação em tempo real da taxa de injeção de carvão pulverizado para os altos fornos.

A matemática e os métodos avançados da engenharia do controle moderno para sinais discretos [82] fornecem as equações a diferenças para os processos multivariável de entrada e multivariável de saída em especial do tipo analisado nesta tese de doutorado. Estes trabalhos foram relatados em [83].

Capítulo 10

Estratégias de Controle para a Vazão de Carvão

10.1 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE ADOTADAS NO PCI

Este capítulo é o principal da tese e finalmente mostra as ações efetivas no controle visando a estabilidade da vazão de carvão da estação de injeção. As estratégias de controle adotadas para reduzir a variabilidade da vazão de carvão pulverizado a curto e em longo prazo são analisadas e seus resultados descritos.

As ações para minimizar a variabilidade instantânea da vazão de carvão são descritas em especial e seus resultados analisados e discutidos como resultado final da tese.

10.2 DESCRIÇÃO DO CONTROLE DA INJEÇÃO DE CARVÃO

O valor de referência da vazão de injeção do controlador da válvula de dosagem era realizado por uma seleção entre dois modos pelo operador em t/h ou vinculado ao sinal de vazão de sopro dos altos-fornos. No primeiro modo o operador entra diretamente com o valor desejado em t/h. No segundo modo o operador entra com a taxa de injeção de g/m³ na CNTP e o “set-point” da vazão de injeção em t/h é calculado em função do valor da vazão de ar soprado.

Estes dois modos não eram suficientes para a estabilidade operacional do alto-forno e, portanto, foram inseridas três novas estratégias de regulação conforme a seguir, onde a influência dos modos de controle do pedido da vazão de carvão pulverizado em sua variabilidade

Quando a vazão de ar quente soprado é reduzida, a taxa de injeção de carvão diminui proporcionalmente. Isto quer dizer que a vazão do ar soprado influencia na variação de vazão de carvão por apresentar oscilações naturais ou ainda devido a equalização de regeneradores, uma vez que o enriquecimento de oxigênio afeta a produção de ferro-gusa.

A variabilidade da vazão de carvão conforme ilustrado pela Equação (3.1) depende não somente da constância da variável de processo, mas também com o pedido de injeção feita pelo operador (“set-point”)

Por outro lado, a vazão de ar soprado muda com as condições operacionais do alto-forno e pelas equalizações periódicas dos regeneradores. Sempre que um regenerador equalizava a pressão de ar soprado, a cada 50 minutos, ocorria uma grande variação na injeção.

Como a variação da vazão de ar soprado interfere com a taxa de injeção de carvão, o erro na resposta do sistema de controle ficava amplificado, pois as duas malhas operavam em cascata. A Figura 10.1 a seguir ilustra os dois modos de controle de “set-point” originais que são o estado da arte, e foram previstos no descritivo funcional de engenharia básica do fornecedor do processo PCI.

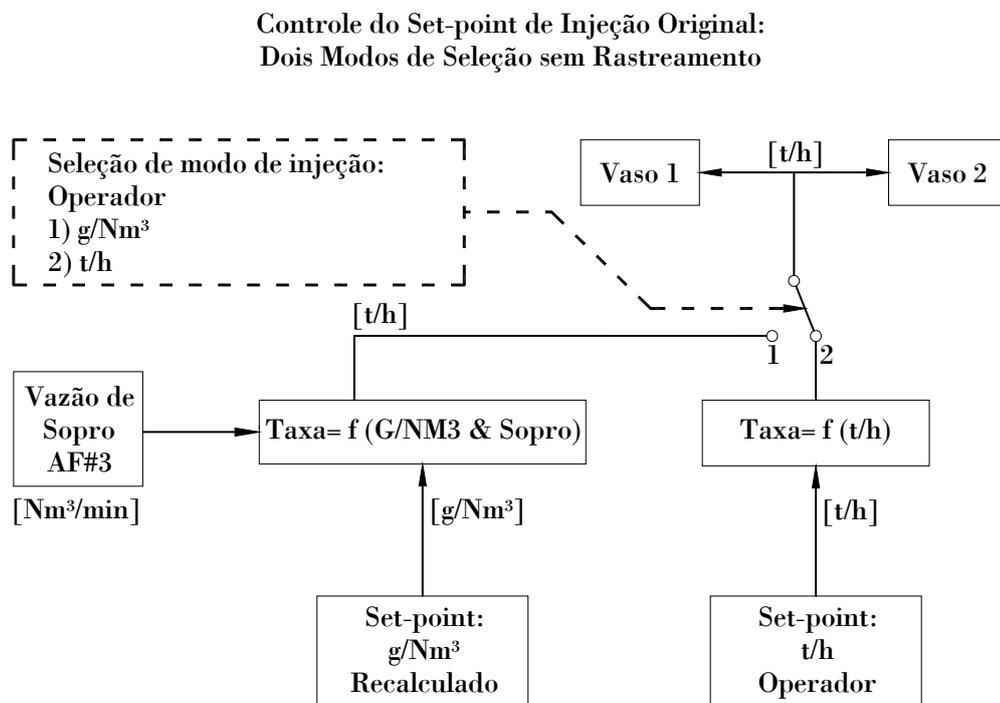


Figura 10.1 - Controle do “set-point” de injeção (dois modos sem rastreamento)

De acordo com a Figura 10.1, quando o valor de referência é feito para a vazão de carvão (primeiro modo) o sistema de controle não atua em cascata, utiliza apenas o valor inserido pelo operador. Todavia, quando é ativado o segundo modo, ou seja, a taxa de injeção, as malhas de controle ficam em cascata e a vazão de carvão é atualizada o tempo todo. Assim sendo, se o operador voltar para o primeiro modo com um valor qualquer haverá uma descontinuidade brusca no processo causando instabilidade operacional.

A Figura 10.2 ilustra o diagrama esquemático do controle do valor pedido de “set-point” de injeção para evitar variações bruscas entre as trocas de modos de injeção.

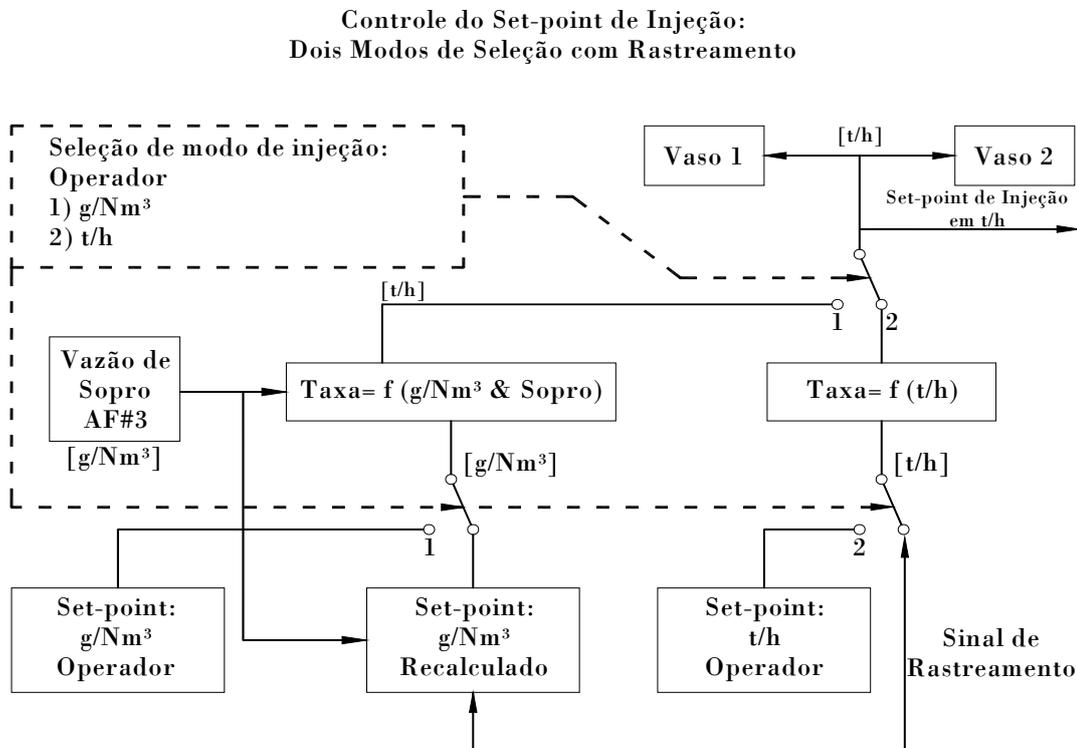


Figura 10.2 - Controle do “set-point” de injeção (dois modos com rastreamento)

Deve-se notar que a alteração na malha de controle existente atualiza o valor existente de referência calculado internamente a partir da taxa de injeção em g/m^3 na CNTP em relação ao valor pedido pelo operador em t/h quando muda do segundo para o primeiro modo de controle e vice-versa.

Para que o processo passe a independe dos valores introduzidos pelo operador subitamente foi desenvolvida uma malha de controle de modo a alterar o valor anterior para o desejado de forma gradativa.

O SDCD Yokogawa [15] possui como instrumento padrão um limitador de velocidade de mudança de variável de processo. Ele foi configurado e implantado após a geração do “set-point” em t/h, de tal modo a variar suavemente o pedido do controlador de vazão e fornecer um tempo suficiente para ajuste do processo sem causar grandes variações no percentual da vazão de carvão.

A Figura 10.3 ilustra o funcionamento do bloco de instrumento limitador de velocidade de SV e seus parâmetros de ajuste (Dmp e Dmn):

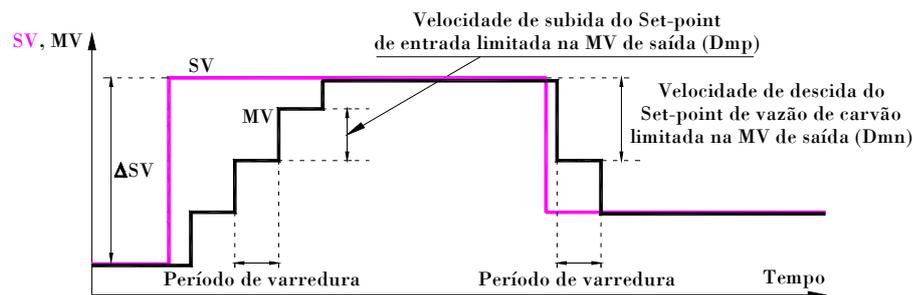


Figura 10.3 - Bloco do instrumento VELLIM do SDCD Yokogawa [15]

O controle da limitação da variação do set-point de vazão reduz a variação percentual de injeção, pois permite um maior tempo para repercussão das ações de controle. A função faz com que a variação do “set-point” do controlador de vazão de carvão aconteça em degraus limitados de 3,6 t/h a cada minuto.

10.3 PRODUÇÃO INSTANTÂNEA DE FERRO-GUSA DO ALTO-FORNO

O cálculo da produção instantânea de ferro-gusa do alto-forno é utilizado na malha de controle para que seu valor de referência da vazão de carvão pulverizado fique vinculado a taxa de produção instantânea de ferro-gusa do alto-forno, ou seja, a vazão de carvão passou a depender do ritmo de carga e produção dos altos-fornos. Este sistema adicional de controle representa o terceiro modo de operação, identificado como “**Seleção de Injeção PCR**”.

Para que SDCD do sistema do PCI pudesse executar o controle de injeção de carvão por PCR, foi necessário desenvolver um novo sinal via o PLC do alto-forno para representar o ritmo de produção atual ou instantâneo. Para tal, foi desenvolvido um novo algoritmo para gerar um sinal analógico confiável de controle. Em seguida, este sinal foi enviado para o SDCD do PCI.

A Figura 10.4 ilustra a tela principal de operação do AF3 da CSN.

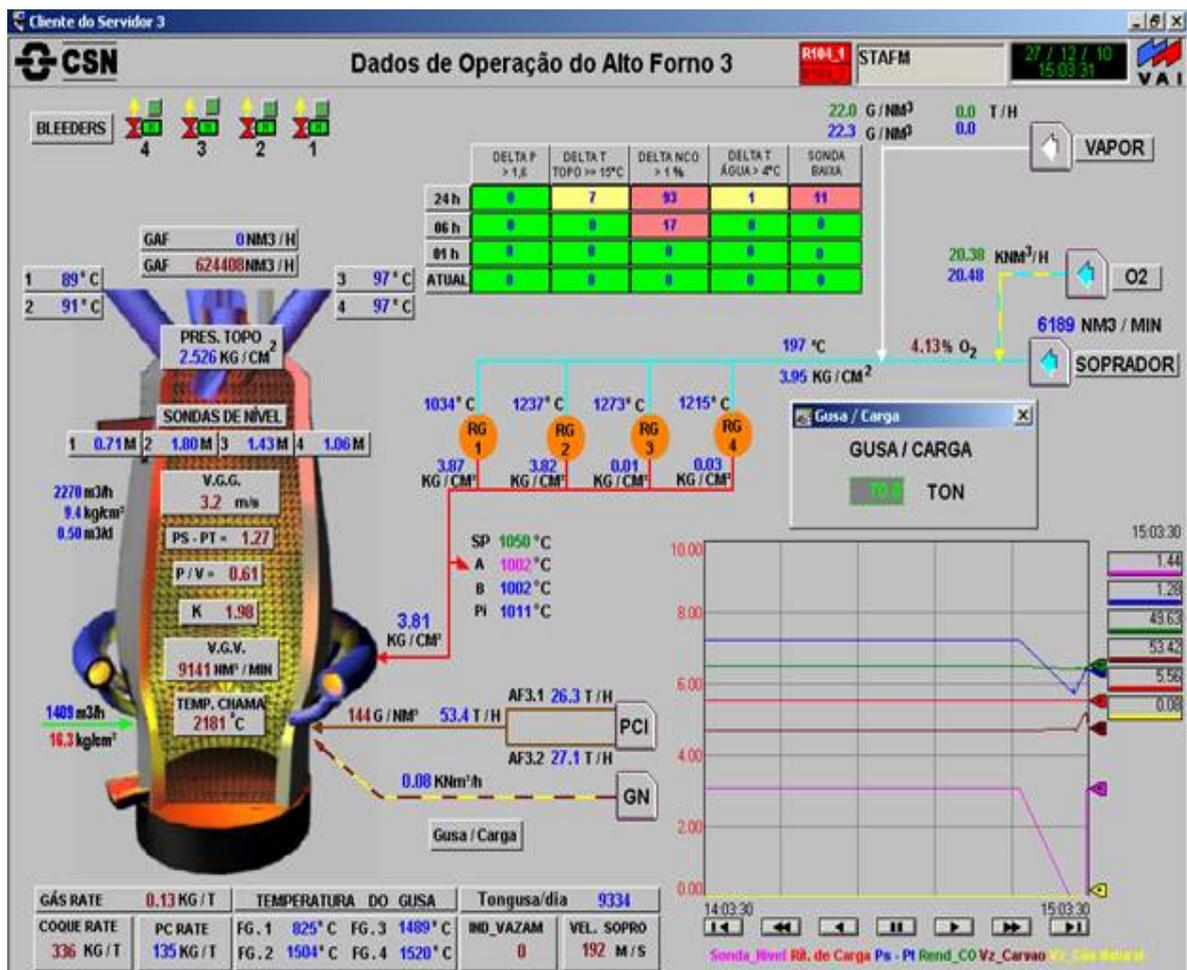


Figura 10.4 - Tela de operação principal do AF3 e a relação gusa/carga

Nota-se o valor estimado da produção diária de 9334 t/dia e o campo de entrada onde se ajusta o valor gusa/carga por exemplo em 70 t. Isto define a quantidade de ferro-gusa que se encontra inserida no alto-forno para cada quantidade de carga estabelecida.

Este campo foi criado exclusivamente para a implantação do modo de injeção por PCR descrito nesta tese, visto que este valor pode variar de acordo com a produção programada para o alto-forno.

A Tabela 10.1 a seguir ilustra um exemplo típico da aquisição de dados e a forma com que o cálculo da produção instantânea do alto-forno foi desenvolvido.

Tabela 10.1 - Exemplificação do cálculo do ritmo de produção do alto-forno					
Intervalo	Tempo em s	Base de tempo em s	Fator de adianto/atraso [1]	Carga Base	Resultados na FILO
ΔT_1	580	600	0,966	6,0	6,32
ΔT_2	600	600	1,000	6,0	6,0
ΔT_3	620	600	1,033	6,0	5,8
...
ΔT_9	1199	600	$\sim 0,5$	6,0	$\sim 3,0$
ΔT_{10}	1200	600	0,0	6,0	0,0
Média móvel dos resultados da FILO					6,04

Na Tabela 10.1, os intervalos de tempo entre duas cargas consecutivas ΔT_i e ΔT_j ($j = i + 1$) são armazenados em memória do tipo FILO composta de 10 amostras ($i = 1$ a 9 e $j = 2$ a 10). A base de tempo adotada foi de 600 s e foi escolhida em função do ritmo de carregamento normal do alto-forno.

Para cada ΔT_i , foi incorporado um filtro de saturação para determinar o tempo gasto para cada ciclo de carga e foi limitado entre 300 a 1200 s para que não haja grandes distúrbios no processo.

O fator de atraso ou avanço, da Tabela 10.1, depende do ritmo de carga do alto-forno. Quando seu valor é unitário, o ritmo de carga está na produção nominal estipulada pelo cálculo do leito de fusão. Se o carregamento está acelerando devido a descida de carga no alto-forno, seu valor é menor que a unidade. Se o carregamento atrasa, o tempo gasto para o ciclo de carga fica elevado atrasando a produção e reduzindo seu valor médio.

A média móvel dos resultados da memória tipo FILO mostrada na parte inferior da Tabela 10.1 é multiplicada pela relação gusa/carga de modo a se obter a produção horária ou por minuto ou por segundo.

A detecção do intervalo entre cargas é feito através da transição de um dos dois últimos bits menos significativos do contador do ciclo de carga, o qual é reiniciado diariamente as zero hora.

No SDCD do PCI por sua vez, o operador entra com o valor desejado da injeção em PCR, ou seja, em kg/t de ferro-gusa produzido é efetuado para gerar o "set-point" de vazão de carvão pulverizado em t/h.

10.4 CONTROLE DA VAZÃO PELO RITMO DE CARGA DO ALTO-FORNO

O controle da vazão de carvão por ritmo de carga do alto-forno ou “set-point” vinculado ao ritmo de carregamento do alto-forno introduz um novo modo de controle para determinar o valor de referência (“set-point”) de injeção de carvão pulverizado que é descrito a seguir.

A Figura 10.5 ilustra a nova forma de controle desenvolvida para o ajuste do set-point de Injeção. Ele possui três modos de seleção com rastreamento entre eles. Existe uma chave seletora de “software” com um (1) e três (3) posições onde se pode escolher um dos três modos de injeção desejados.

Além disto, para se evitar o distúrbio conhecido como “bump” entre trocas de modos de injeção foi criado um rastreamento com cálculo inverso para as três opções de tal modo que a troca é “bumpless”, ou seja, não traz perturbações no sistema de controle de injeção por desatualização dos “Set-points” em relação aos outros modos de injeção.

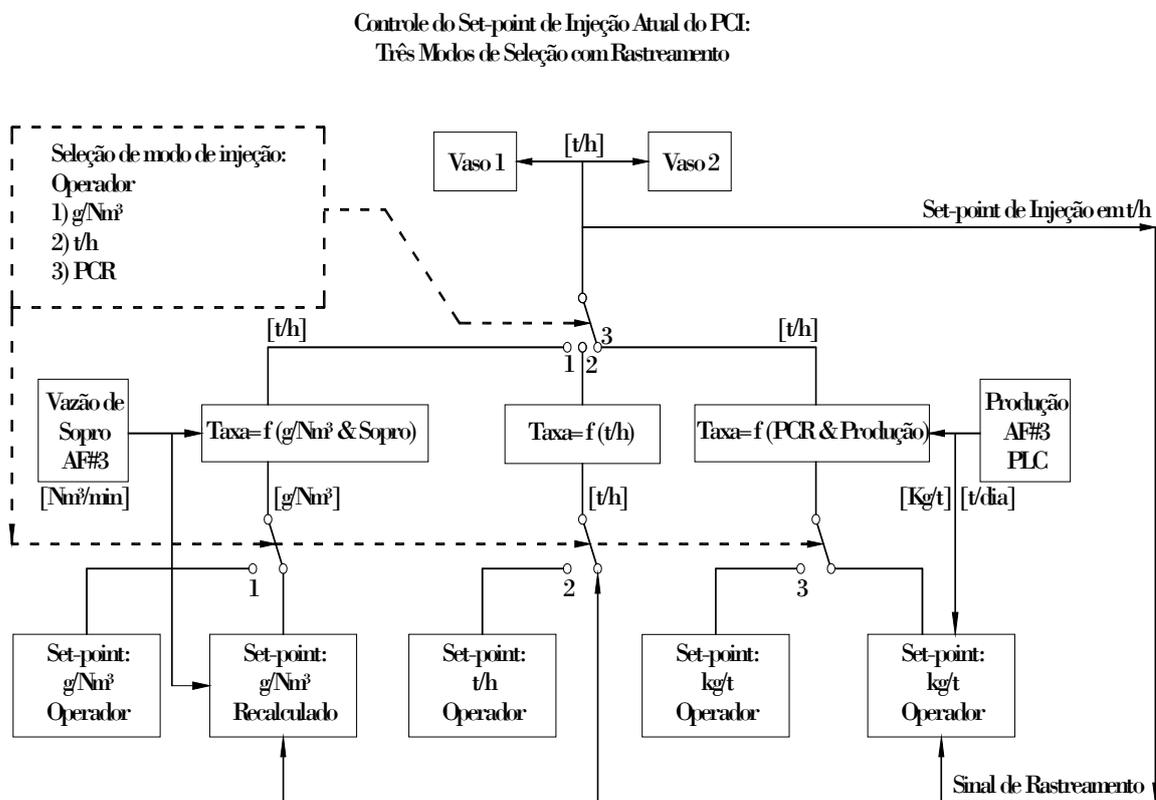


Figura 10.5 - Controle do “set-point” de injeção (três modos com rastreamento)

Para implantação deste novo modo de controle do valor do set-point da vazão e carvão pulverizado injetado, os operadores de alto-forno e os supervisores foram treinados a voltar para controle de injeção em g/m^3 na CNTP em algumas situações especiais:

- a - Parada de Injeção prolongada por defeito na estação de injeção;
- b - Parada do carregando do alto-forno por mais de 15 minutos;
- c - Queda do Motosoprador por defeito ou falta de energia elétrica da geração;
- d - Parada de alto-forno ou redução da vazão de ar quente soprado.

Quando a regularidade do carregamento das cargas do alto-forno enforçadas, o controle de injeção pode retornar para o modo PCR em kg/t é retornado. Como a produção calculada do alto-forno é computada em 6 amostras a cada 10 min, é necessário pelo menos 1 hora de carregamento normal do alto-forno antes de se retornar o controle novamente de g/m^3 na CNTP para kg/t .

10.5 IMPLANTAÇÃO DE BANDA MORTA VARIÁVEL NO CONTROLADOR

A ação de banda morta em um controlador é uma função não-linear que elimina a ação de controle enquanto o desvio permanece dentro de uma faixa aceitável para o controle do processo.

Para o controle da variação da vazão de carvão pulverizado, se o erro está dentro da faixa aceitável pelo processo ($<\pm 5\%$) não há razão para modificação dos controladores na busca da utopia de erro zero por cento.

Na tese, foi implementado um cálculo variável para ajuste contínuo da banda morta do controlador de vazão de carvão pulverizado de modo a estabilizar a malha de controle. Se o erro percentual estiver abaixo de 3%, a variável manipulada ficará congelada, ou seja, permanecerá com o mesmo valor enquanto o desvio for menor que o ajuste da banda morta.

Este cálculo é efetuado a todo instante e ajustado nos controladores. O DB de 3% do set-point de vazão de carvão em valores absolutos é calculado no SDCCD de acordo com a Equação (10.1):

$$DB = 0,03 C_{\text{REQUE}} \quad (10.1)$$

Portanto, se o $DV \leq DB$, ou seja, se o desvio instantâneo do controlador de vazão de carvão for menor que o valor absoluto da faixa morta configurada automaticamente pela Equação (10.1) o controlador permanecerá com a saída congelada até que o desvio seja maior que o aceitável.

Foram definidas pela equipe de engenheiros metalúrgicos dos altos-fornos da CSN diversas zonas de variação percentual da vazão de carvão para classificação do desempenho do controle de processo de uma maneira geral, conforme visto no Capítulo 3. Em cima desta classificação, foi adicionada uma faixa estreita de $\pm 3\%$ em que o controle é considerado excelente e não há razão para distúrbios e correções da malha de controle de vazão de carvão no processo em busca da utopia do erro zero por cento ou inexistente.

A Tabela 10.2 indica as considerações gerais sobre o desempenho dos controladores de vazão de carvão quanto a classificação adotada na CSN juntamente com a implantação da banda morta na faixa em que o controle é consideração excelente.

Tabela 10.2 - Classificação da grandeza do desvio na vazão de carvão pulverizado		
Variação percentual da vazão de injeção: classificação do desempenho do controle da vazão de carvão pulverizado	Faixa do desvio percentual aceitável	Ação do controlador
Excelente	$- 3\% \leq DV\% \leq 3\%$	Congelado $DV\% < DB\%$
Ótimo	$5\% \geq DV\% > 3\%$ ou $- 5\% \geq DV\% < - 3\%$	Ação PI
Regular	$10\% \geq DV\% > 5\%$ ou $- 10\% \geq DV\% < - 5\%$	Ação PI
Ruim	$15\% \geq DV\% > 10\%$ ou $- 15\% \geq DV\% < - 10\%$	Ação PI
Péssimo	$- 15\% > DV\% > 15\%$	Ação PI + saturação no cálculo da vazão

Observa-se que a ação do controlador PID é inibida se o desvio % for menor que a banda morta percentual. Na realidade o controlador recebe estes valores em termos absolutos e, portanto o valor absoluto da banda morta é variável ao passo que o valor percentual é constante.

Na prática, os valores de desvio padrão observados para o processo das estações de injeção oscilam entre 1,8 a 2,2 t/h, ou seja, média 2 t/h, independente da vazão de carvão média.

Se a vazão média for de 20 t/h, em 66% do tempo de injeção os valores ficarão entre 18 e 22 t/h considerando 2 t/h de desvio padrão e 10% de variação percentual de injeção. E em 99% do tempo, este valor ficará em 3δ (3 desvio padrão), ou seja, 6 t/h, significando uma variação de 14 a 26 t/h, ou seja, de até 30% de variação máxima ou variação de pico.

Porém o desvio percentual ou variação de injeção percentual cai a medida que se aumenta a vazão média de carvão pulverizado. Na prática, o desvio padrão se mantém praticamente constante em cerca de ± 2 t/h.

Se a vazão média aumenta de 20 para 60 t/h, em 66% do tempo de injeção os valores ficarão entre 58 e 62 t/h significando apenas 3,3% de variação percentual de injeção. E em 99% do tempo de injeção o valor da vazão ficará 54 e 66 t/h, ou seja, apenas 10% de variação instantânea de pico na vazão de carvão.

Portanto, a variação de carvão percentual é inversamente proporcional a vazão de carvão pedida pelo alto-forno, pois o desvio padrão dos controladores é praticamente constante.

De uma maneira geral, a Equação (10.2) retrata um dos fundamentos principais da tese.

$$DV\% \sim \frac{1}{V_z(t)} \Big|_{\delta = \text{constante}} \quad (10.2)$$

Onde:

DV%: Variação percentual da vazão de carvão;

$V_z(t)$: Vazão de carvão pulverizado na linha principal;

δ : Desvio padrão da vazão de carvão.

A principal meta da tese então é minimizar a variação percentual de injeção através da minimização do desvio padrão dos controladores de vazão de carvão, uma vez que variação percentual é um valor absoluto e o desvio padrão é relativo.

Conclui-se que quanto maior a vazão de carvão demandada pelo alto-forno mais estável vai ser a combustão do carvão e menor será a variabilidade percentual de vazão de carvão.

Portanto, a variabilidade percentual da vazão de carvão é inversamente proporcional ao PCR, ou seja, quanto maior a vazão de carvão em t/h demandada pelo alto-forno menor será o tempo em que a vazão permanece fora das zonas de controle aceitáveis pela cinética das reações de combustão no “Raceway”.

10.6 FILTROS PARA O CONTROLE DE VAZÃO DE CARVÃO

Os filtros desenvolvidos para o controle da vazão de carvão foram basicamente limitam o valor da variável de processo dentro de margens de valores aceitáveis e elimina valores altos devidos a erros nos valores derivativos do sistema de pesagem e o cálculo da Equação 6.1.

A média móvel do algoritmo do cálculo da vazão de carvão através da derivada do peso do vaso de injeção é realizada a cada 6 s por um temporizador.

Caso haja um vazamento de grandes proporções nas válvulas prato ou alívio as válvulas de pressurização rápida e a pressurização do anel de fluidização são abertas durante a fase de injeção para repor a pressão de nitrogênio perdida.

Durante esta reposição, um volume imenso de nitrogênio sem controle é inserido na fase durante a fase de injeção causando um grande distúrbio no processo. O efeito era que a medição de vazão de carvão caia e tendia a zero devido ao acréscimo de peso ao invés de decréscimo de peso. Isto fazia com que o controlador PI de vazão abrisse a válvula dosadora até 100% para que o pedido de vazão de carvão fosse atendida. Com isto a perda de nitrogênio ou passagem preferencial de nitrogênio pela válvula dosadora aumentava mais ainda perpetuando a reposição de nitrogênio pela válvula dosadora. Isto causava um grande distúrbio na vazão de carvão.

Para se evitar este fenômeno agravado pelo controle clássico PI, o cálculo da vazão foi congelado enquanto o comando da válvula de pressurização rápida estiver aberto. Assim, a posição da válvula dosadora é mantida numa posição fixa sendo última posição do controle antes da reposição de nitrogênio em abundância pela válvula de pressurização rápida. Quando a pressão do vaso é normalizada, o temporizador de 6 s da média móvel tem sua contagem liberada.

No retorno, o cálculo da média móvel é liberado, mas, porém com filtro de saturação de $\pm 15\%$ do valor de "set-point", para valores entre 20 e 50 t/h, de acordo com a Equação (10.3):

$$S\% = \text{Saturação} = \pm 15\% C_{\text{REQUE}} \quad (10.3)$$

Neste filtro, os valores calculados pelos algoritmos de vazão $F(t)$ são limitados em de 0,85 a 1,15 vezes o valor do set-point do controlador de vazão de carvão.

Somente após a implementação destes dois filtros foi possível minimizar a variação da vazão de carvão, estabilizar a posição da válvula dosadora e conseguir o menor desvio padrão da variável de processo.

A implantação efetuada deste filtro ainda necessitou de uma implementação que tomasse o filtro menos distorcido com relação ao real valor da vazão de carvão.

Portanto, caso o set-point seja menor que 20 t/h os limites de saturação do filtro são elevados ao quadrado, ou seja, de 0,7225 a 1,3225, de acordo com a Equação (10.4):

$$S\%^2 = \text{Saturação}^2 = - 27,75 \text{ a } 32,25\% \quad (10.4)$$

Portanto, a faixa do filtro de saturação da PV, vazão de carvão, é expandido quadraticamente para que a saturação do filtro interfira com o controlador de vazão para valores menores que 20 t/h. Os filtros de variáveis de processo são de uso polêmico, mas necessário, pois eliminam interferências e ruídos de diversas naturezas tais como:

- Interferências eletromagnéticas nos instrumentos;
- Interferências do processo;
- Erros de medição devido ao método de aquisição da variável de processo;
- Ruídos inerentes a medição e ao processo.

Os filtros são necessários para o tratamento dos sinais de instrumentação usados no controle de processos. Os filtros possuem diversas funções e parâmetros que eliminam e minimizam o ruído presente na variável de processo obtida pelo instrumento, neste caso, obtido pelo sistema de pesagem e pelo algoritmo do cálculo da vazão de carvão pela média móvel. De uma maneira geral os filtros mitigam os ruídos indesejáveis de uma variável de processo que perturbam a estabilidade do sistema inadequadamente.

Somente após a implantação dos filtros contra o efeito da pressurização rápida e com os limites de saturação da variável de interesse $F(t)$ o controle de vazão instantâneo do carvão pulverizado minimizou a distribuição Gaussiana dos histogramas de variabilidade ficou menos dispersa e o desvio padrão para uma mesma vazão média. Caiu de 2,2 para 2 t/h.

O interessante observado no resultado da implementação do filtro de saturação foi a redução da dispersão gaussiana da variação percentual instantânea de carvão sem perturbar o funcionamento da malha de controle em longo prazo (IE).

O valor da variável de processo do desvio acumulado de longo prazo malha de controle da integral do erro absoluto permanece dentro da faixa de -200 a +200 kg onde não há correção do set-point requerido pelo alto-forno e o valor pedido a longo prazo possui um erro menor que 0,1% em relação ao valor da quantidade de carvão integrada pelo mesmo medidor.

Este erro não considera a reposição do volume de carvão pelo volume de nitrogênio em cerca de -2,5%, conforme comprovado no capítulo 6.

As filtragens de saturação são extremamente úteis nos seguintes casos:

- Perda de pressão elevada do vaso de injeção com abertura na válvula de pressurização e congelamento da média móvel;
- Vazamentos nas válvulas prato e alívio;
- Durante o período de 30 s na troca de vasos de injeção;
- Possíveis erros de software, não descritos e determinados gerados durante o algoritmo de cálculo da vazão.

Enfim o filtro de saturação regressivo para mitigar os ruídos e controle geral da vazão de carvão pulverizado. Os valores de $\pm 15\%$ para saturação são variáveis de acordo com a vazão de carvão pedida (SV). Os valores maiores que 15% tais como 20% não se mostram tão eficazes para mitigar a dispersão Gaussiana dos histogramas de variação de injeção da Figura 3.1.

Os valores menores que 15% eliminam a análise da dispersão e podem comprometer o real controle. Houve teste com valores de até 12% com maiores sucessos, porém o limite ficou estabelecido em 15% devido a influência na análise do critério de variação da vazão de carvão. Isto vem sendo mantido neste patamar desde a sua criação uma vez que os valores menores são injustos e valores maiores diminuem o desempenho da filtragem dos sinais.

A Figura 10.6 ilustra a evolução do valor percentual de corte do filtro de saturação do valor calculado de $F(t)$ de acordo com a Equação (3.1) influenciando no resultado final de $Vz(t)$ Equação (3.2) que usado como variável de processo do controlador principal de vazão de acordo com o progresso do valor vazão de carvão.

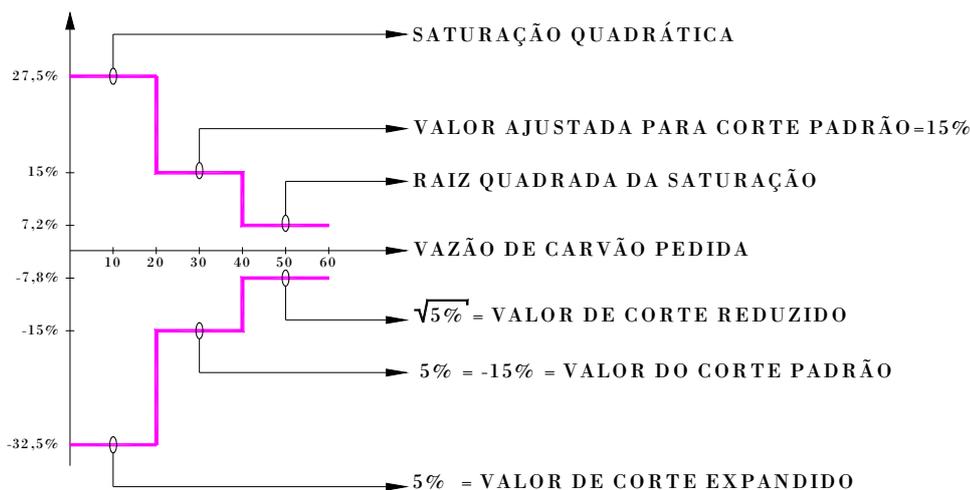


Figura 10.6 - Variação do valor de corte do filtro de saturação

Pode notar na Figura 10.6 que o filtro de saturação possui valor de corte variável para não influenciar na medição de vazões de carvão para valores menores que 20 t/h e aumentar seu desempenho e ação para valores maiores que 40 t/h.

O filtro mostra-se eficiente no controle, porém não detecta falha de fluxo de carvão que ocorre durante a troca de vasos ou grandes vazamentos nas válvulas prata e alívio durante a fase de injeção. Para detecção da falha de fluxo de carvão, com desabilitação temporária dos detectores de fluxo de carvão localizados após as válvulas de carvão do distribuidor, foi implementado sinal de falha de fluxo de carvão obtido pelo Densflow.

De posse de outra medição de vazão que não possuía influência do filtro de saturação pode-se manter o controle de vazão principal estável e não deixar que as linhas de injeção de carvão, após, o distribuidor irem para purga de nitrogênio por detecção falsa de entupimento de lança de injeção.

Portanto, a medição de vazão do Densflow possui funções complementares na estratégia de controle da variabilidade não só na linha geral bem como na lança, pois evita purga do N_2 desnecessário devido a detecção de falta de fluxo de sólidos devido a falha na vazão de carvão (só passa N_2) ao passo que não existe nenhuma detecção de falha de fluxo de carvão devido a possível entupimento.

10.7 A ABERTURA INICIAL DA VÁLVULA DOSADORA NA INJEÇÃO

A abertura inicial da válvula dosadora após a troca de vasos no início da injeção é um dos pontos cruciais para minimizar a variação de injeção instantânea de curto prazo.

A lógica original de projeto do fornecedor Claudius Peters definia que a posição da abertura inicial da válvula dosadora no início da fase de injeção devia ser a cópia memorizada do ultimo valor da posição do controle no final da fase de injeção do ciclo anterior.

A Figura 10.7 a seguir ilustra as variáveis de processo principais dos vasos de injeção do AF2 durante sua troca. Para esta simulação real, o controle de posição inicial da válvula dosadora foi desligado momentaneamente e os parâmetros ($P = 120$ e $I = 20$) do controlador PI-Hold foram alterados de tal modo a diminuir o tempo de resposta do controle e provocar uma oscilação inicial. Esta oscilação atípica do sistema de controle nos primeiros 10 minutos de injeção após a troca, entre (10h20 e 10h30min), provoca uma variação na vazão de carvão para o alto-forno.

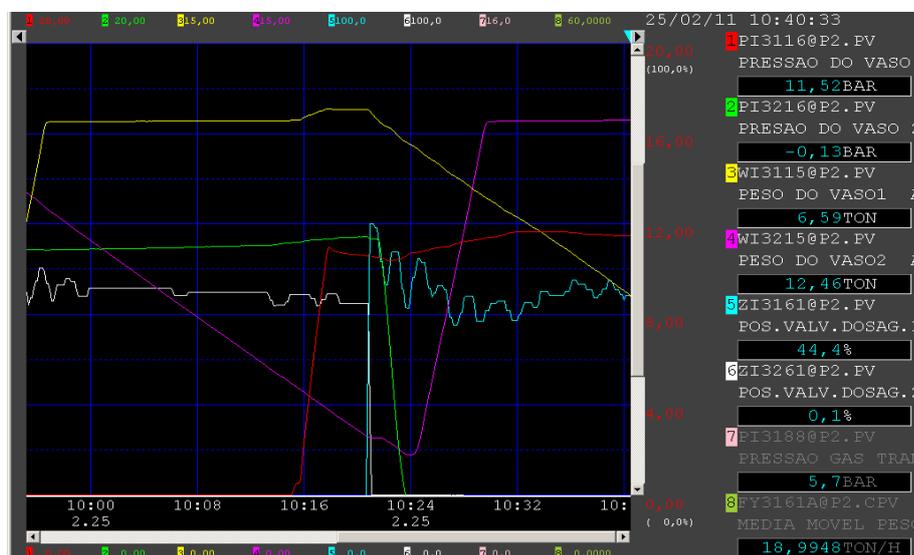


Figura 10.7 - Variação da posição da válvula dosadora com o peso do vaso de injeção

Nota-se o peso, a pressão e as posições finais e iniciais da válvula dosadora dos vasos 2 e 1 respectivamente. A posição inicial certa da válvula dosadora e uma diminuição da dinâmica do controle eliminaram este comportamento de variação oscilatória na vazão de carvão após a troca de vasos.

Pode-se ver que a medida que o carvão do vaso é injetado a válvula dosadora vai fechando independente da vazão de carvão solicitada. Na nova estratégia de controle de tese, a abertura inicial da válvula dosadora é o **segredo** para se minimizar a variabilidade da vazão de carvão alcançando patamares de 80% de acerto na faixa ótima de $\pm 5\%$ e desvio padrão de até 1,5 t/h.

Em seguida um temporizador de 30 segundos equivalente a metade da média móvel foi usado para se manter o controlador em manual, ou seja, parado, com a válvula dosadora estacionada para se efetuar uma limpeza inicial de dados no início da fase de injeção após toda a troca de vasos. Logo após, o controlador é liberado automaticamente para efetuar o controle da vazão de carvão durante o restante da fase de injeção.

A Figura 10.8 ilustra os resultados dos cálculos inversos das posições ótimas de abertura inicial das válvulas dosadoras dos vasos 1 e 2.

CSN		CALCULO DA ABERTURA INICIAL DA VALVULA DOSADORA			YOKOGAWA	
SIMBOLO	DESCRIÇÃO	DETALHE	VALORES		UNIDADE DE ENG.	
			VASO 1	VASO 2		
ZI	Posição da Valvula Dosadora	Med. Obtida pelo Indicador de Posição da Area	52,90	0,00	%	
d	Diam. Restrição Valvula Dosadora	Med. Obtida Pelo Desenho confirmada em Area	21,16	0,00	mm	
a	Area Restrição Valvula Dosadora	Area Transversal Min. Int. Valvula	0,44	0,00	mm ²	
k	Constante de Calculo Vazão	Constante Bernoulli	241905	0	V/(h ² m ² bar)	

Figura 10.8 - Cálculo inverso da posição ótima de abertura inicial da válvula dosadora

Para o cálculo inverso da posição ótima de abertura inicial da válvula dosadora, os valores da constante de Bernoulli (Figura 10.8) e da pressão do distribuidor são armazenados a cada fase de injeção de acordo com o algoritmo a seguir:

- Vaso no início da injeção (12 >W> 10 t)?
- &
- Controle de vazão estável? (DB% < 5%)?

Armazena a constante de Bernoulli e da pressão do distribuidor para o cálculo inverso para a abertura inicial ótima da válvula dosadora.

A constante de Bernoulli varia entre 200 e 300 k durante a fase de injeção estável. A Equação (10.5) reproduz o modelo efetuado em tempo real no SDCD para o cálculo da constante de Bernoulli do vaso 1 da Figura 10.8 em $t/(h.m^2.bar)$:

$$k_1 = \frac{q_{C,F}}{a_1 \sqrt{2\rho_F(P_I - P_T)}} \quad (10.5)$$

Onde:

$q_{C,F}=Vz(t)$ = valor atual da vazão de carvão em t/h vinda da média móvel;

P_I =valor atual da pressão de injeção em bar;

P_T =valor atual da pressão de transporte em bar;

ρ_F =densidade do fluxo bifásico atual em kg/m^3 ;

a_1 = área atual da dosadora do vaso 1 em mm^2 .

A pressão do distribuidor, P_D , tem seu valor típico para cada vazão de carvão e depende de fatores como o comprimento das linhas após o distribuidor, da pressão do ar soprado, diâmetros internos das linhas e das vazões do fluxo bifásico.

Entretanto, a pressão do distribuidor depende essencialmente se há lanças simples ou duplas e do número de lanças injetando (válvulas de carvão abertas no distribuidor) que pode variar ao longo do tempo.

Para se obter a abertura ideal, pode-se substituir $q_{C,F}$ por C_{REQU} na Equação 8.15, a densidade do carvão pela densidade do fluxo bifásico calculada na Equação 8.30 e a pressão de injeção calculada pela Equação 8.1. Finalmente, obtém-se a Equação (10.6) para o cálculo da abertura ideal da válvula dosadora, produto nobre da tese:

$$a_1 = \frac{C_{REQU}}{k_1 \sqrt{2\rho_F(P_I - P_T)}} \quad (10.6)$$

Onde:

C_{REQU} = valor pedido para a vazão de carvão;

P_I =valor do “set-point” de pressão de injeção;

ρ_F =densidade de fluxo bifásico;

k_1 = constante de Bernoulli do vaso 1 armazenada durante sua última fase de injeção.

A pressão de transporte é obtida pela pressão do distribuidor armazenada durante sua última fase de injeção com o auxílio da Equação (10.7):

$$P_T = \Delta P_L - P_D \quad (10.7)$$

Onde:

ΔP_L = valor esperado para a queda de pressão na linha;

P_D = valor armazenado da pressão do distribuidor no início da injeção;

P_T = valor da pressão de transporte esperada para as condições ajustadas do TP;

O valor esperado para a queda de pressão na linha pressão de transporte é obtida pela velocidade e densidade do fluxo bifásico aplicados na equação 8.30.

e a distribuidor armazenada durante sua última fase de injeção com o auxílio da Equação (10.8):

$$\Delta P_L = \left(\frac{4f}{L_E} + \sum k \right) + \rho_F C^2 \quad (10.8)$$

ρ_F = densidade de fluxo bifásico;

L_E = comprimento equivalente da linha de transporte;

C = velocidade esperada para o fluxo bifásico.

Uma vez obtida a área ótima de abertura a_1 da restrição da válvula dosadora e aplicando-se as Equações (8.15) e (8.16) de forma inversa, obtém-se a posição de abertura inicial ideal (ZI ótima) que é o produto final da modelagem.

Este valor é calculado em tempo real no SDCD e é colocado na estratégia de controle visando se obter uma troca de vasos com as mínimas perturbações possíveis na vazão de carvão.

10.8 MALHA DE CONTROLE DE VAZÃO DE LONGO PRAZO

A variabilidade da quantidade de carvão injetada ao longo do tempo é de suma importância para o balanço de massa e combustíveis do alto-forno de acordo com seu leito de fusão programado.

Portanto, apesar da variação percentual ser notada visualmente em gráficos de tendência, a variação na quantidade integrada do erro entre o valor de referência “set-point” e o valor medido (PV) não é. O capítulo 7 apresentou as integrações periódicas da vazão de carvão instantânea efetuadas ao longo prazo, onde pode-se visualizar os resultados das medidas efetuadas. É importante que este erro seja o menor possível, com valores típicos menores que ± 200 kg no período de 8 horas, ou seja, não mais que ± 250 kg/h de erro na quantidade de carvão para uma vazão de 25 t/h horária injetada, representando a tolerância média de somente $\pm 1\%$ de erro desejável pelo alto-forno.

A integral do erro do controlador de vazão contém este desvio acumulado a longo prazo, sendo que esta malha de controle de vazão de carvão de longo prazo implantada por esta tese corrige o desvio de carvão. Uma vez que o processo de injeção é contínuo, a integral do erro IE tem que ser definida durante o período de amostragem, ou seja, periodicamente. Isto é feito para se ter um número que relacione todos os erros do controlador da vazão de injeção ao longo do intervalo de amostragem (8h).

O valor IE é conhecido como desvio acumulado em longo prazo e é usado para se fazer o ajuste fino dos parâmetros dos controladores de vazão e pressão do vaso de injeção. O valor do IE foi calculado no SDGD e inserido no controle para definir a correção necessária no valor de referência (set-point) final das estações de injeção de carvão pulverizado. Ele visa corrigir o desvio negativo ou positivo em longo prazo bem como efetua o acompanhamento diário do desempenho das malhas de controle através de sua variabilidade.

O valor de referência é apresentado por uma determinada vazão de carvão a ser inserida no forno pelo vaso que é definida pelo operador ficando na faixa de 10 a 50 t/h de carvão. Para a faixa de erro típica entre 2% a 5%, ou seja, erro da vazão de 200 a 2500 kg/h será permitido um desvio máximo da IE de ± 200 kg quando não haverá correção no “set-point”.

A correção ocorre quando o IE ficar nas faixas:

$200 \text{ kg (2\%)} < \text{IE} < 1000 \text{ kg (10\%)}$

$-1000 \text{ kg (-10\%)} < \text{IE} < -200 \text{ kg (-2\%)}$

Com base no IE o fator de correção do “set-point” em longo prazo fica, portanto definido simplesmente conforme a seguir:

Erro de 2%: multiplica-se o valor de “set-point” por 0,98.

Erro de -2%: multiplica-se o valor de “set-point” por 1,02.

Erro de 10%: multiplica-se o valor de “set-point” por 0,90.

Erro de -10%: multiplica-se o valor de “set-point” por 1,10.

Para valores de IE intermediários aos limites entre -2% e -10% e entre 2% a +10%, a correção é linear respectivamente de 1,02 a 1,10 e de 0,98 a 0,90.

Esta malha de controle garante que o desvio máximo acumulado em tempo real não ultrapasse o valor de 800 kg. Caso os valores de IE sejam superiores/inferior a estes valores máximos e mínimos de desvio acumulado em longo prazo, o fator de correção permanecerá fixo em 0,9 ou 1,1. Caso o IE supere 1000 kg foi desenvolvido um alarme informando ao operador a necessidade de intervenção no processo para identificar a causa do desvio e efetuar as correções necessárias em campo.

O principal desenvolvimento deste trabalho foi a correção do desvio acumulado em longo prazo. Uma vez que o processo de injeção é contínuo, a integral do erro IE tem que ser definida durante o período de amostragem, ou seja, periodicamente. Isto é feito para se ter um número que relacione todos os erros do controlador de taxa de injeção ao longo do intervalo de injeção.

A Equação (10.9) ilustra o novo critério de avaliação e ajuste do controle desenvolvido baseado na IE e no tempo de amostragem, T, do processo contínuo como no caso PCI ou em bateladas como no caso exemplo da EDG (Estação de Dessulfuração de Gusa em Carro Torpedo) da CSN:

$$IE = \int_0^T (SP - PV) dt \quad (10.9)$$

Onde:

T: Intervalo de integração;

IE: Integral do erro durante o intervalo de integração.

O número desenvolvido, IE periódico (Equação 10.9) é conhecido como desvio acumulado em longo prazo e é usado para se fazer o ajuste fino dos parâmetros dos controladores de vazão e pressão do vaso de injeção.

O valor do IE é calculado no SDCD e inserido no controle do set-point final das estações de injeção de carvão pulverizado. Ele visa corrigir o desvio negativo ou positivo em longo prazo bem como o acompanhamento diário do desempenho das malhas de controle através de sua variabilidade.

Uma malha de controle de ajuste fino do set-point faz parte da tese de doutorado. Ela visa garantir uma correção que ocorre em longo prazo de até ± 1000 kg. Neste ponto, ocorrerá um alarme informando ao operador a necessidade de intervenção no processo, reset do alarme ou até diminuição da vazão de carvão.

A Figura 10.9 ilustra a ação desta malha de controle onde se tem o desvio acumulado em tempo real, as faixas de limite de atuação e o set-point de vazão de injeção de carvão onde pode-se ver sua influência.

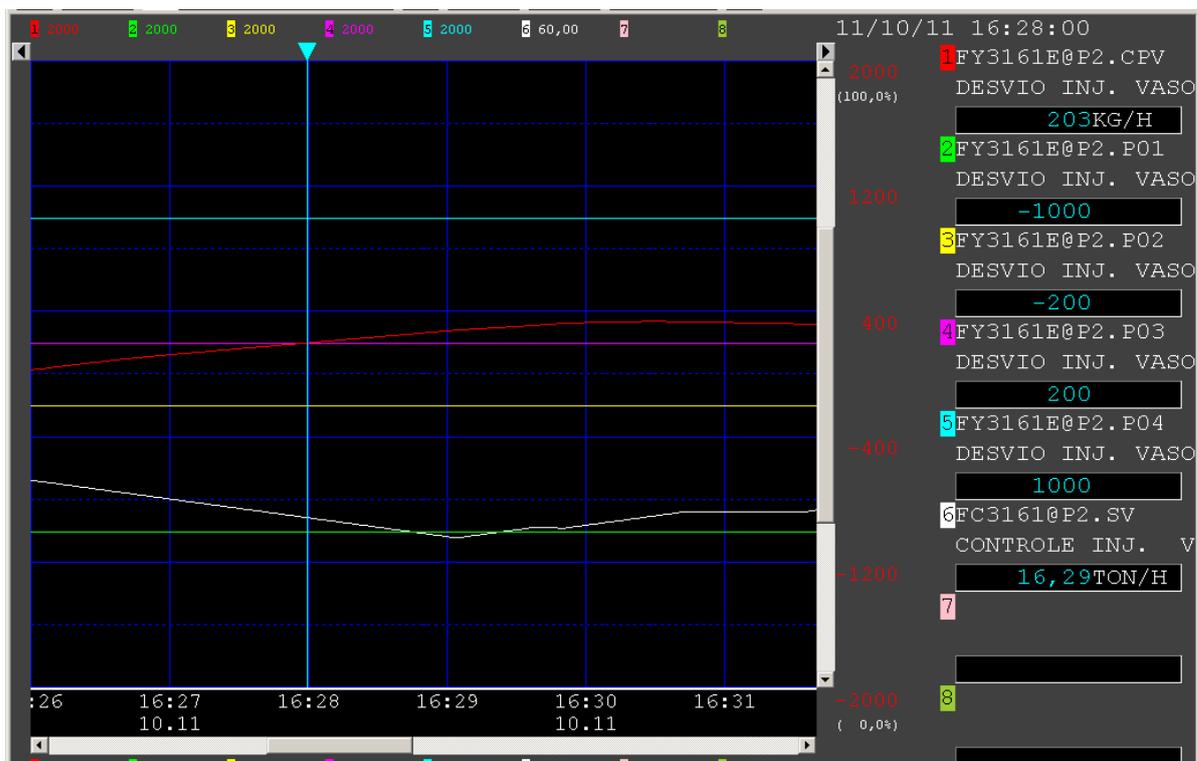


Figura 10.9 - Desvio de Injeção Acumulado e as Faixas de Controle

A Figura 10.10 ilustra a ação desta malha de controle na correção do set-point de vazão de injeção de carvão onde se pode ver sua influência.

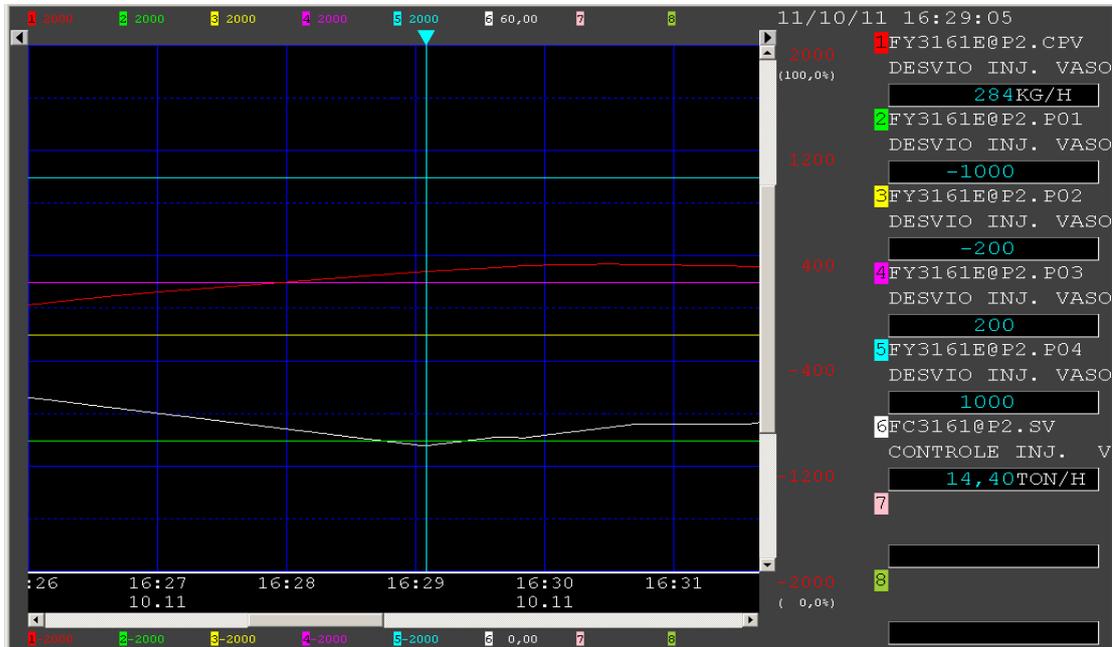


Figura 10.10 - Influência do Desvio de Injeção Acumulado no Valor de Set-point de vazão de carvão

Finalmente, a Figura 10.11 ilustra o final da ação desta malha de controle onde se pode ver que o valor do “set-point” de vazão de injeção de carvão é corrigido em função de seu valor.

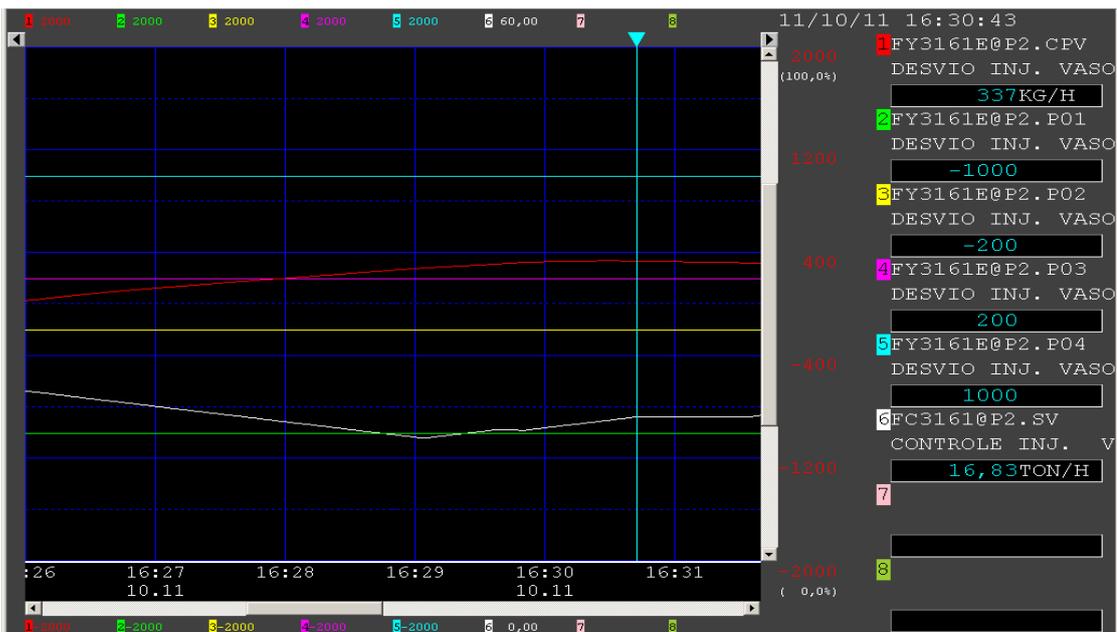


Figura 10.11 - Valor de Set-point de vazão de carvão retornando ao normal

10.9 A NOVA MALHA DE CONTROLE PARA A VAZÃO INSTANTÂNEA

No sistema de injeção de carvão pulverizado fabricado pela Paul Wurth [26], o controle da vazão global de carvão é realizado por uma malha de controle composta por uma válvula especial (Grisko) e um medidor de vazão mássica de correlação cruzada: Densflow da SWR ou Granucor da Thermo Ramsey.

A Figura 10.12 ilustra a nova malha de controle de vazão desenvolvida para planta PCI da CSN. Ela é baseada em células de carga junto com o Densflow, ou seja, levando-se vantagem de cada medição em cada situação do processo.

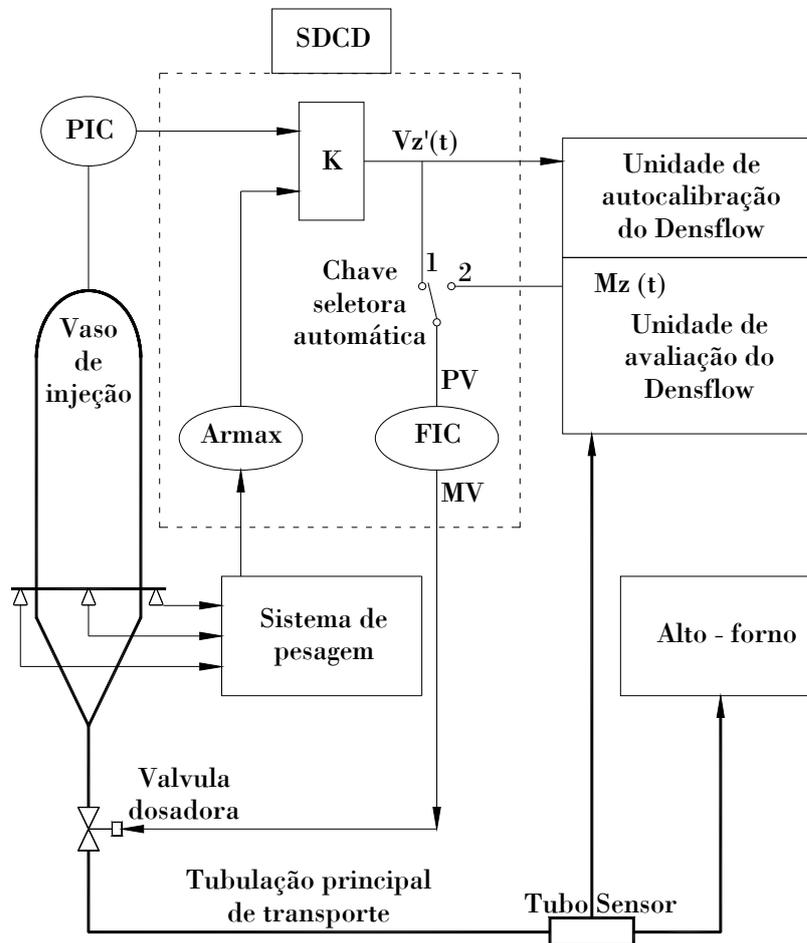


Figura 10.12 - A nova malha de controle de vazão

O sinal de vazão de carvão do Densflow, $M_s(t)$, também é usado para fornecer um controle secundário e auxiliar durante a troca de vaso.

Portanto, foi configurada uma chave auto-seletora de “software” que efetua a troca da variável de processo para o controlador de vazão de carvão (FIC) durante os seguintes eventos e situações:

- Troca de vaso (1 minuto a cada 20 minutos);

Ou

- Abertura da válvula de pressurização rápida durante a fase de injeção;

Ou

- Falha no sistema de pesagem.

Entretanto, a maior utilidade comprovada do sinal de vazão mássica do Densflow é a detecção da falha de fluxo de carvão na linha principal de transporte e a conseqüente desabilitação temporária dos detectores de carvão da linha (GranufLOW) ou dos detectores de carvão da bifurcação da lança dupla (Flow Jam).

Com esta implementação, evitou-se a purga automática do distribuidor e a atuação desnecessária das válvulas de carvão e de nitrogênio cuja oscilação provocava entupimento de lanças, com acúmulo de cilindros sinterizados de carvão obstruindo especialmente a ponta da lança de injeção. Esta foi a maior contribuição prática do equipamento Densflow no processo de injeção de carvão pulverizado.

Capítulo 11

Resultados e conclusões sobre as Estratégias de Controle para a Vazão de Carvão

11.1 RESULTADOS DAS ESTRATÉGIAS DE CONTROLE IMPLANTADAS

Os resultados obtidos dos ajustes, filtros, controle por PCR e demais dispositivos de controle podem ser comparados, pois tem-se no PCI em estudo duas estações de injeção do AF3 que contém equipamentos diferentes com processos similares. A estação AF3.1 possui média de 35,92 t/h e a estação AF3.2 possui 35,95 t/h. O controle da estação de injeção AF3.2 está melhor que a estação AF3.1, pois possui um desvio padrão menor. As barras dos histogramas, a média da vazão de carvão e a integral de erro acumulada também confirmam este fato.

Quando ocorre um problema de controle do vaso de injeção tais como vazamentos e falhas no sistema hidráulico das válvulas de dosagem de carvão, ou ainda no sistema de transporte pneumático, vazão e pressões de controle, a vazão final de carvão pulverizado na linha principal para o alto-forno é afetada. A faixa boa cai para cerca de 40 a 55% do valor total do tempo amostrado.

Um dispositivo avançado de medição mássica de vazão de carvão com correlacionador matemático e uma unidade de auto calibração foi especialmente projetado e instalado nas tubulações de transporte principal das três estações de injeção de carvão pulverizado. Novas malhas de controle avançada e adicionais foram implementadas para estabilidade da vazão de carvão pulverizado. Portanto, agora a planta PCI toma vantagem de cada medida de vazão de carvão e escolhe a melhor delas para cada situação do processo visando o melhor controle de vazão possível.

As ações de controle desenvolvidas para maior estabilidade para a vazão de carvão proporcionada pelas variações suaves nos set-point de pressão de injeção cujo “set-point” está em cascata com o pedido do set-point da vazão de carvão do controlador principal, diminuíram a variabilidade da vazão na linha principal.

A limitação de velocidade de mudança no “set-point” de vazão de injeção trouxe estabilidade adicional para todas as outras 3 malhas de controle do vaso de injeção que também estão em cascata com o “set-point” de vazão de injeção em t/h.

O controle de correção de “set-point” do controlador de vazão de carvão em longo prazo e a correta medição da vazão de carvão proporcionou o acerto estequiométrico das reações de redução obtendo uma maior estabilidade térmica e confiabilidade no valor montante injetado de carvão a longo prazo no alto-fornos da CSN. A estabilidade térmica proporcionada pelo PCI levou a uma maior estabilidade operacional do processo metalúrgico com menor desvio padrão de silício na produção de ferro-gusa. O desvio padrão caiu de 2,5 para 2 t/h e o acerto na faixa ótima de 60 para 70%, sendo este o principal resultado desta tese.

Alterando-se a lógica de intertravamento das válvulas automáticas de fechamento de fluidização conseguiu-se que os filtros fluidizadores não entupissem de carvão. Assim, não houve mais registros de entupimento nas linhas de vazão de fluidização que são essenciais para o bom desempenho do transporte pneumático de carvão pulverizado para os Altos-fornos. A precisão da estabilidade da taxa de injeção melhora substancialmente devido a não ocorrência de grandes perturbações nos controles de pressão, fluidização e fluxo de carvão durante o período de injeção.

O controle de correção de “set-point” em longo prazo pelo valor do IE proporcionou uma maior estabilidade térmica e acerto na quantidade do carvão injetado no período de 8h reduzindo o erro de 1 para 0,1% no desvio acumulado.

11.2 CONCLUSÕES SOBRE A INJEÇÃO POR RITMO DE CARGA

O novo modo de injeção em PCR permite que o operador ajuste o valor desejado de PCR em kg por t de ferro-gusa produzido. O pedido da taxa injeção foi vinculada com o ritmo de produção de gusa do forno em t/min, além de se efetuar o rastreamento entre os “set-points”. Houve uma maior estabilidade no nível térmico do forno em função da injeção de carvão (balanço de energia) estar em cascata com o ritmo de produção. Os resultados dos desvios padrão de teor de silício e enxofre observados na qualidade do ferro-gusa produzido com este controle são menores.

Como resultado para fase seguinte do processo (Aciaria), a estabilidade operacional é obtida através de um controle mais preciso da qualidade do ferro-gusa para a produção de aço com mais baixo nível de inclusões, ou seja, aumento de qualidade. O volume de escória foi reduzido nos conversores da aciaria, o que resultou num ataque menor aos refratários, o que aumenta o tempo entre reparos e sua vida útil.

A redução em quantidade de poder calorífico exigida contribuiu diretamente à estabilidade térmica, que transforma este efeito no aumento de produtividade e redução valor e no desvio padrão do Silício no ferro-gusa. Baseado nos resultados operacionais obtidos pode-se mencionar como pontos positivos desta implementação, descritos no trabalho [44]:

- Aumento na qualidade do ferro-gusa com diminuição do desvio de Si e S;
- Maior agilidade operacional e facilidade de controle térmico do alto-forno;
- Melhor combustão do carvão causada pela menor divergência da quantidade injetada x pedida;
- Modo preciso e avançado para estabilizar a operação do alto-forno.

A variação da taxa de carregamento do alto-forno é menor que a variação da vazão de sopro, o que contribui para diminuição da variabilidade da vazão de carvão na linha principal de injeção. A maior contribuição deste controle em modo cascata é a manutenção térmica do alto-forno de acordo com o andamento de sua produção.

Normalmente poucos sistemas de automação e controle modernos contêm as funções ou blocos de software já incorporados para cálculo da média e desvio padrão. Mesmo no caso do moderno SDCD Centum CS do fabricante Yokogawa do PCI foi necessário desenvolver algoritmos de média acumulativa, pois estes equipamentos são para controle do nível 1 (chão de fábrica) [86] e não são apropriados para modelagem de processos e cálculos matemáticos, conhecido como nível 2 da pirâmide de automação. Então, os algoritmos desenvolvidos têm que ser úteis práticos e de simples processamento para se justificarem.

11.3 RESULTADOS NA DIMINUIÇÃO DA VAZÃO DE CARVÃO

Esta tese também teve por objetivo obter a vazão de carvão instantânea, a velocidade das partículas e a densidade de fluxo fornecendo mais parâmetros do transporte pneumático do sistema de injeção. Este instrumento permitiu o desenvolvimento do atual sistema de vazão por células de carga, que calcula a vazão através da média móvel da taxa de decréscimo do peso do vaso.

Assim, foi aumentada a quantidade de sólidos em relação a quantidade de gás de transporte (kg de carvão/kg de N₂), economizando nitrogênio para a mesma taxa de injeção e mantendo a estabilidade da vazão baseado nos fundamentos de [5], [28] e [62].

Esta tese permitiu sedimentar conhecimentos computacionais e matemáticos avançados para modelagem e simulação das malhas de controle dos sistemas de injeção permitindo testar os diversos algoritmos de controladores disponíveis em [15], e novas estratégias e filosofias de automação e controle, tais como:

- Controlador PID;
- Controlador PI com retenção (Hold) ou com sintonia automática;
- Espera despressurizada dos vasos de injeção;
- Pressurização do vaso de injeção com baixa pressão;
- Controle de pressão dos vasos de injeção.

Os modelos dos controladores disponíveis foram simulados e o de melhor resultado foi implementado no SDCD do PCI da CSN para validação do modelo. No SDCD foi configurado um analisador em tempo real com diversos índices clássicos e modernos para avaliação do desempenho de malhas de controle.

Os trabalhos [38], [39], [40] e [41] foram reconhecidos pela comunidade científica para as simulações e experiências práticas decorrentes das modelagens e fenômenos propostos pela tese e de fácil implementação em outros PCIs já implantados no mundo pela Claudius Peters.

A tese de doutorado implantou este sistema de avaliação a curto e longo prazos através de gráficos de tendência e histogramas probabilísticos registrando os resultados da variação instantânea de carvão. Isto não foi feito por nenhum pesquisador antes, e não foi encontrado em nenhuma literatura de controle de processos. No sistema implantado, os desvios percentuais instantâneos ficam normalmente inferiores a 5% durante pelo menos 80% do tempo de amostragem.

Para avaliação da variabilidade da vazão de carvão foi desenvolvida uma ferramenta em tempo real para análise e coleta de dados estatísticos e históricos para comparação e análise das novas estratégias e lógica de controle comentadas nesta tese.

Após a consagração das novas estratégias lógicas do processo e os modelos dinâmicos do processo, outros tipos de controladores modernos tais como MIMO, PID, LQG, Feed Forward, etc..., que são baseados neste estudo preliminar poderão ser implantados, analisados, implementados e seus resultados com base no critério de análise pré-definido discutidos e avaliados.

A Figura 11.1 ilustra o controle moderno proposto para a continuação deste trabalho, onde o modelo dinâmico completo elaborado por esta tese é usado.

O controle estatístico de processo oferece diversas ferramentas para acompanhamento do desempenho de malhas de controle em geral. Porém, para cada tipo de aplicação industrial devem-se levar em conta quais são os parâmetros e níveis de desvio padrão a serem atingidos. As novas técnicas de controle descritas nesta tese proporcionaram a redução na variabilidade da vazão de carvão na linha principal e de transporte pneumático, comprovada pela redução do desvio padrão médio de 2,5 para 1,8 t/h.

11.4 RESULTADOS NOS INTERTRAVAMENTOS DE SEGURANÇA

O sistema de injeção por lança dupla proporcionou diversos estudos extras descritos nesta tese com vista nesta tecnologia, e seus riscos inerentes. De posse deste conhecimento foi realizada a lógica de intertravamento da vazão do tubo reto e dos detectores de fluxo de carvão.

Outro ponto foi a minimização da sinalização dos entupimentos de lança que tinham como causa somente falhas de injeção e não reais entupimentos de carvão sinterizado na ponta da lança. Isto causava também a parada de injeção que tinham como causa o número mínimo de lanças, pois freqüentemente o GranufLOW retirava a lança de injeção desnecessariamente. A especificação de uma nova lança de injeção com diâmetro interno menor e mesmo diâmetro externo (Schedule 160 para Schedule XXS) para a lança dupla foi um dos resultados desta tese.

Outras ações ainda serão implantadas e outras dependem de uma avaliação mais criteriosa do ponto de vista custo versus benefício. Nem sempre compensa investir num equipamento melhor se o problema que ele causa é tolerável.

Os principais ganhos no processo das estações de injeção foram:

- Intertravamento de pressão diferencial de fluxo de carvão e pressão de base do ar quente soprado para o alto-forno;
- Eliminação de tubo reto e algaraviz cheio de carvão na parada do alto-forno;
- Reconhecimento da validade do sinal de vazão de ar quente soprado;
- Número de atuações dos detectores de fluxo de carvão;
- Parada de injeção rápida e parada lenta por vazão de ar soprada baixa ou vazão de nitrogênio de transporte.

- Menor tempo de pressurização do vaso caiu de 170 para 130 s. Conseqüência: Sobra mais tempo para o vaso carregar e se preparar para o novo ciclo de injeção;
- Maior tempo de vida útil válvulas prato e alívio com a espera despressurizada;
- Maior eficiência energética com a pré-pressurização dos vasos de injeção.

11.5 RESULTADOS DAS MODELAGENS

As medições dos parâmetros do transporte pneumático como densidade e velocidade foram realizadas com ajuda de um medidor de sólidos instalado na linha principal e seus resultados usados para as validações do modelo do transporte pneumático. Os valores obtidos comprovam o acerto da modelagem e contribuem para eficiência e melhoria do processo de transporte de carvão pulverizado em fase densa com o menor uso possível de gás de transporte. A estabilidade da vazão de carvão injetada no alto-forno foi obtida não só por otimizações, mas também por novas estratégias de controle.

O ajuste das vazões do transporte pneumático e fluidização dos vasos, a nova seqüência dos vasos de injeção, comportamento da vazão de carvão durante a troca dos vasos, e a implementação de novas estratégias para seqüência e as malhas de controle do processo proporcionaram uma diminuição do desvio padrão da vazão de carvão.

Esta modelagem procurou abranger não só o vaso de injeção bem como todo o processo de injeção desde a estação passando pelo distribuídos e chegando até ao alto-forno.

Os modelos propostos são mais atuais e exibem variáveis de saída do transporte pneumático e da variabilidade e exibem maiores detalhes que os modelos desenvolvidos por Birk et al. (1999), até então estudados.

Os muitos resultados das simulações de processo efetuadas com o modelo proposto para estação de injeção coincidem e se aproximam com os valores encontrados na a prática do dia-a-dia do processo e as variáveis manipuladas dos controladores PID do SDCCD.

O primeiro passo para qualquer desenvolvimento de controlador dedicado, estratégia de controle nova, ou nova implementação de processo tem que ser o desenvolvimento da ferramenta de análise e diagnóstico da variável de processo principal.

11.6 CONCLUSÕES FINAIS DA TESE

Nesta tese, obteve-se uma melhora da vazão de carvão com o auxílio de novas estratégias de controle, a princípio e novos instrumentos para a validação dos modelos e a definição de um critério de medida do desempenho dos controladores.

Esta tese coloca junto todos os problemas, temas centrais e questões importantes relacionadas a sistemas de injeção de carvão pulverizado em altos-fornos. Os diversos modelos dinâmicos elaborados para controle, ajuste e monitoração possibilitaram uma nova visão do processo admitindo novas estratégias de controle e variáveis de interesse no transporte pneumático.

Ficou demonstrado que existe uma relação entre os valores de transporte pneumático e o desempenho do controlador de vazão de carvão, sendo este o tema principal da tese na busca da redução dos três tipos de variabilidade descritos. Seus objetivos foram parcialmente alcançados com êxito.

Capítulo 12

Referências Bibliográficas

- [1] CASTRO, L.F.A.; TAVARES R.P.; **Tecnologia de fabricação de ferro-gusa em altos-fornos - UFMG** - Belo Horizonte (MG), Brasil, Ago. 1998.
- [2] ASSIS, P. S. **Injeção de materiais pulverizados em Altos Fornos**. ABM - Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, Brasil, Out. 1993.
- [3] ISHII, K. et al. **Advanced Pulverized coal injection technology and blast furnace operation**. Hokkaido University, Elsevier Science Ltd., Japan, 2000.
- [4] WEBER, A.; SHUMPE H.; **Pulverized coal injection systems Functional Description - Loop control software for CSN/PCI/Brazil Injection systems/BMH Claudius Peters INDUSTRIE Anlagem GMBH**, Hamburgo (Alemanha), May, 1995.
- [5] MILLS, D. **Pneumatic conveying design guide**. Elsevier Butterworth-Heinemann Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP 30 Corporate Drive, Burlington, MA 01803, 2 ed., Chapter 4, 2005, 100 p.
- [6] YAN, Y. **Mass flow measurement of bulk solids in pneumatic pipelines**. School of Science and Technology, Teesside University, Middleborough, Cleveland, TS1 3BA, UK, Sept 1996.
- [7] LIPÁK; BELA G. **Instrument engineers handbook**, Third ed., 1995, Chap. 2.4, 93 p. and Chap. 7.22.
- [8] JOHANSSON A.; MEDVEDEV, A. **Detection of incipient clogging in pulverized coal injection lines**. IEEE Transactions on Industry Applications, 36 v. Nº 3, Lulea Suécia, May / June 2000.

- [9] BIRK, W. **Multivariable control of a pneumatic conveying system**. Master in Science thesis - Luleå Tekniska Universitet - Institutionen för Systemteknik, Suécia, 1999.
- [10] BIRK, W.; MEDVEDEV, A. **Pressure and flow control of a pulverized coal injection vessel**. IEEE - International Conference on Control Applications in Hartford, Connecticut USA, Oct. 5-7 Proceeding of the 1997, 127-132 p.
- [11] BIRK, W.; JOHANSSON, A.; JOHANSSON, R.; MEDVEDEV, A. **Implementation and industrial experiences of advanced control and monitoring in coal injection**. Elsevier Science LTD, IEEE Control Engineering Practice 8, 2000, 327-335 p.
- [12] BIRK, W., JOHANSSON, A., MEDVEDEV, A. **Model-Based control for a fine coal injection plant**. IEEE Control System Magazine - International conference on control applications 19 (1), 33-43, Feb. 1999, 127-132 p.
- [13] SILVA, A. M. **Estudo da combustão dos carvões e misturas com coque verde de petróleo injetadas em altos fornos**. - Tese de mestrado - Unesp, Guaratingueta, jun. 2006.
- [14] GUIMARÃES, C. C.; ASSIS, P. S; SOBREIRA, L. C; SILVA, W. L. V. **Estudo sobre fatores que influenciam nas condições térmicas do alto-forno provenientes das variações no processo de injeção de carvão pulverizados em alto-fornos**. 40 Seminário de Redução de Minério de Ferro de matérias-primas e 11º Seminário Brasileiro de minério de ferro, Belo Horizonte, set. 2010.
- [15] YOKOGAWA **SDCD Yokogawa modelo Centum CS®**, Manual de Configuração, Japão, Jan. 1994. YOKOGAWA ELÉTRICA CORPORATION **Field control station function manual of DCS Centrun cs Im 33G3C10-01E**. 2nd ed. May 1995.

- [16] MCMILLAN, B.; WOJSZNIS, B. **Advanced Control Unleashed - plant performance management for optimum benefit.** ISA - the instrumentation, systems and automatic society.
- [17] DELMEÉ G. **Curso Introductório ás técnicas de controle avançado.** 1997. Disponível em: www.digimat.com.br. Acesso em: 10 dez. 2010.
- [18] MOTTA, R. S. N.; ZANETTI, C. H.; FIGUEIRA R. B.; GONÇALVES G. O. **Desenvolvimento do sistema de injeção de carvão pulverizado da CSN.** VII Seminário de Automação de Processos Industriais da ABM, Santos, out. 2003.
- [19] MOTTA, R. S. N.; ZANETTI, C. H.; BALDINI R. F.; MENDES, R. **Expansão da capacidade nominal de injeção da planta PCI da CSN de 40 para 50 Ton/h.** XXII Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades, ABM - Associação Brasileira de Metalurgia, João Monlevade (MG), Junho 2000.
- [20] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E. **A new sequence for coal injection vessels.** Revista Stahl und Eisen 130 (2010), SP59-SP69 - Alemanha.
- [21] SWR ENGINEERING MESSTECHNIK GMBH. **Manuais do Flowjam S e Densflow.** Disponível em: www.swr-engineering.com. Acesso em: 10 dez. 2010.
- [22] JOHANSSON, A. **Model - based leakage detection in a pressurized system.** master in Science - Lulea University of Technology, Suécia, Oct. 1999.
- [23] DYNAMIC AIR CONVEYING SYSTEMS LTDA **Catálogo de 16 conceitos de transporte pneumático** Nazaré Paulista, 2003.
- [24] VELCO INDUSTRIE GUNBH **Pneumatic injection equipment for iron and steel industry.** Velbert (Alemanha), Dec. 2010.
- [25] STEIN INDUSTRIE **Anlagem GMBH pneumatic conveying, dosing and injection - systems.** Gevelsberg (Alemanha), Aug. 2009.

- [26] PAUL WURTH - **Pulverized coal Injection Systems**. Catalogue 2010, Luxemburgo.
- [27] KÜTTNER DO BRASIL **Injeção de Carvão em Altos-Fornos**. Contagem, dez. 1992.
- [28] SILVA, D. R. **Transporte pneumático: tecnologia**. 1ª ed., Chapter 4, pp. 100, São Paulo: Artliber Editora Ltda, Ago. 2005.
- [29] BISHOP, D. **Performance indices for closed-loop control modern control systems**. Pearson, Pretence-hall, 2005.
- [30] SPIEGEL, M. **Probabilidade e estatística**. 5ª ed. (Coleção Schaum).
- [31] BUSSAB W. O.; MORETTIN P. A. **Estatística básica**. 4ª ed. São Paulo: Atual Editora, 1987.
- [32] NIPPON STEEL CORPORATION **200kg/t PCI at less than 500kg/t fuel rate**. Stell Times International Magazine, Alemanha, Mar. 1995.
- [33] TAKANO, C. **Termodinâmica e cinética no processo de dessulfuração de ferro e aço**. Conferência Técnica Internacional de Dessulfuração e Controle de Inclusões ABM, Santos (SP), out. 1997.
- [34] OKOCHI, I.; MAKI, A.; SAKAI, A.; SHIMOMURA, A.; SATO, M.; MURAI, R. **Achievent of high rate pulverized coal injection of 266kg/t**. ATS-RM, 4º ECIC, Paris 2000, 196-202 p.
- [35] WEISER, R.; BRAUNE, I.; MATTHES, P. **Control blast furnace pulverized coal injection to increase PCI rates**. AMEPA Gmbh, Alemanha.
- [36] OLIVERIA, R. R.; MANETTA, H, et al. **Operação dos altos-fornos da V&M do Brasil com altas taxa de injeção de carvão pulverizado**. V. 5, nº 2, Revista Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, out./dez. 2008, 105-110 p.

- [37] OGATA K. **Engenharia de controle moderno**. 4ª ed., Pearson Education, São Paulo, 2003.
- [38] TORRES, B. S.; SILVA, L. A.; PASSOS, L. F.; REIS, W.; BARROSO, E. **Avaliação de desempenho, diagnóstico e ajuste de malhas de controle de temperatura, pressão, vazão e nível**. 5º Congresso Internacional de Automação, Sistema e Instrumentação, ISA Show 2005, São Paulo.
- [39] TORRES, B. S.; PASSOS L. F.; RODRIGUES, V. J. P. **Metodologia para redução de oscilação de malhas de controle em uma usina de beneficiamento de minério de ferro**. 5º Congresso Internacional de Automação, Sistema e Instrumentação, ISA Show 2005, São Paulo.
- [40] TORRES, B. S.; HORI, S. E. **Avaliação de desempenho de malhas de controle em indústrias petroquímicas**. 4º Seminário Nacional de Controle e Automação (SNCA), Salvador, jul. 2005.
- [41] DUMONT, G. A.; et al. **Control system performance monitoring: new developments and practical issues**. 15th Triennial World Congress, IFAC, Barcelona Spain, 2002.
- [42] GUIMARÃES J. F. **Redução de variabilidade, otimização e controle avançado de processos**. 6º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação, São Paulo, 2006.
- [43] MOTTA, R. S. N.; ZANETTI, C. H.; FIGUEIRA, R. B.; FRANKLIN, F.; SILVA, A. J. L. **Reduction of pulverized coal injection system stops**. The 5th European Coke and Ironmaking Congress, Stockholm, Sweden, 2005.
- [44] NOLDE, H. D.; EIDINGER, F. T.; RAFI, M. **Optimizing blast - furnace coal injection systems/BMH Claudius Peters A.G**. Asia Stell, Alemanha, 1999.

- [45] CASTRO, S. M. **Pressurização do anel de fluidização dos vasos de injeção de carvão pulverizado**. Monografia de Graduação - Universidade Federal Fluminense, Volta Redonda (RJ), jul. 2008.
- [46] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E. **Evolução tecnológica das estações de injeção de carvão pulverizado da CSN**. 40º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Tecnologia Mineral, Belo Horizonte (MG), 19 a 22 de setembro 2010.
- [47] SHAO, F.; LU, Z.; WU, E.; WANG, S. **Study and industrial evaluation of mass flow measurement of pulverized coal for Iron-making Production**. Flow Measurement and Instrumentation, Elsevier, 2000, 159-163 p.
- [48] THERMO RAMSEY COMPANY. **Manuais do Granuflow e Granucor**. Disponível em: www.thermoramsey.com. Acesso em: 10 dez. 2010.
- [49] WADECO. **Manuais do Solidflow**. Disponível em: www.wadeco.co.jp. Acesso em: 10 dez. 2010.
- [50] BORTONI, E. C.; SOUZA Z. **Instrumentação para sistemas energéticos e industriais**. Itajubá: Gráfica e Editor Novo Mundo Ltda, 2006.
- [51] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E. **Pulverized coal flow detectors for blast furnaces**. Metallurgical Plant and Technology International Magazine - ISSN 0935-7254, abr. 2009, 36-42 p.
- [52] NOLDE, H.D.; HILGRAF, P. **New Distribution and Feed System for Blast Furnace Coal Injection**. 3th International Conference on process Development in iron and steelmaking, Scanmet III, Estocolmo, Suécia, 2008.
- [53] ALLI, F. **Development of a measurement system of blast flow rate in the tuyere breast of Arcelor Mittal moulevade blast FURNACE**. 38º Seminário de Redução de Minério de Ferro e Matérias-primas, São Luiz (MA): 3rd International Meeting Sept. 2008.

- [54] MOTTA et al. **Modeling of the measurement of flow measurement of the flow of hot air in straight tube of Blast furnace.** 39th Seminar of Reduction of Ore of Iron and Raw materials, Ouro Preto (MG), Nov. 2009.
- [55] NORA, B. S. **Automação do sistema de lança dupla para injeção de carvão pulverizado nos Altos-Fornos da CSN.** Universidade Severino Sombra Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia Elétrica, Vassouras (RJ), 2009.
- [56] CHATTERJEE, A. **Injection in Blast furnaces.** Stell Times International Magazine, Alemanha, Mar. 1995.
- [57] DELMÉE, G. J. **Como comprar instrumento para a medição de vazão.** Revista Instec, Jul. 1993.
- [58] DELMÉE, G. J. **Manual de medição de vazão.** São Paulo - Editora Edgard Blücher Ltda, 1983.
- [59] SOUZA, A. C. Z.; PINHEIRO, C. A. M. **Introdução à modelagem, análise e simulação de sistemas dinâmicos.** Editora Interciência, 2008.
- [60] AGRIRRE, L. A. **Introdução a identificação e sistemas técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais.** 3^a ed, Editora UFMG, 2007.
- [61] LUYBEN, W. L. **Process modelling, simulation, and control for chemical engineers.** International Student Edition, McGraw-Hill Kogakusha Ltd., 1973.
- [62] PERRY, R. A. **Perry's chemical engineers hand book.** 16 ed. International Edition McGraw: Hill International Editions, 1984.
- [63] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E. **A medição real da vazão de carvão pulverizado.** 40^o Seminário de Redução de Minério de Ferro, ABM - Associação Brasileira de Metais e Metalurgia, Belo Horizonte (MG), 19 a 22 de setembro 2010.

- [64] GUIXUE, C.; WEIGUO, P.; WEI, Z.; HAIZHOU, D.; CHAO, Z. **A soft-sensor method based on fuzzy rules for pulverized coal mass flow rate measurement in power plant.** International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, 2009.
- [65] RAHIM, R. A.; LEONG, L. C.; CHAN, K. S.; HAHIMAN, M. H.; PANG, J. F. **Real time mass flow rate measurement using multiple fan beam optical tomography.** ISA Transactions 47, 2008, 3-14 p.
- [66] RIBEIRO, R. B. **Medição da vazão de sólidos no sistema de injeção de carvão pulverizado da CSN.** Monografia de Graduação da Universidade Severino Sombra, Vassouras (RJ), jul. 2009.
- [67] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E.; SCHMEDT R. **Enhanced pulverized coal flow measurement.** 6th European Coke and Ironmaking Congress (ECIC), 27th June to 1st July 2011, Düsseldorf, Alemanha.
- [68] SANTOS, J. M.; FARIA, M. R.; MACHADO, M. T. P. **Cálculo da vazão de carvão pulverizado.** 1º Seminário de Instrumentação, Elétrica e Refrigeração da CST - Companhia Siderúrgica Tubarão, Vitória, 1999.
- [69] SHAMLOU, P. A. **Handling of bulk solids theory and practice.** Butterworth & Co. Publishers Ltd, 1988.
- [70] WIRTH K. E. **Die grundlagen der pneumatischen foerderung, chem, ing.** Nr 2, Tech, 55, 1993, 110-122 p.
- [71] WEBER, M. **Fortschitte bei der Auslegung pneumatische foerderanlagen.** Nr 7, Chem. Ing. Tech 55, 1993, 524 - 539 p.
- [72] KRAMBOCK W. **Apparate fuer die pneumatische foerderung Aufbereitungstechnik.** Nr. 8, 1982.

- [73] XIÃO-PING C.; YUN Z.; et al. **Effect of properties of pulverized Coal on dense phase pneumatic conveying at high pressure.** The 6th International Symposium on measurement techniques for Multiphase Flows, Journal of physics: Conference Series 147 (2009) IOP publishing.
- [74] CAI, L., XIAOPING, C., et al. **Flow characteristics and dynamic behavior of dense-phase pneumatic conveying of pulverized Coal with variable moisture content at high Pressure.** Korean Journal Chemistry Engineering, vol. 26, nº 3 Nov. 2008.
- [75] THOMAS, P. **Simulation of industrial process for control engineers.** Elsevier Butterworth-Heinemann, 1 ed., Linacre House, Jordan Hill, Oxford OX2 8DP, 225 Wildwood Avenue, Woburn, MA 01801-2041, 1999.
- [76] ROUSEMOUNT, F. **Control valve and book.** 2nd ed. ROSEMOUNT, F.; ROAD, K.; ROCHESTER, S.; KENT; ENGLAND; **ME2 2EZ.** 60-78 p.
- [77] VALTEK; **Control valve sizing and selection.** Chapter 3, Revision 6, 1994, Disponível em: www.valtek.com.br. Acesso em: 10 dez. 2010.
- [78] SIGHIERI, L.; NISHINARI, A. **Controle automático de processos industriais.** 2 ed. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1998.
- [79] ENOMOTO, H.; MATSUDA, T. **Encyclopedia of fluid mechanics.** v4, Houston: Gulf Publishing Company, 1986.
- [80] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E. **Controle de oxigênio das moagens de carvão da CSN.** 39º Seminário de Redução de Minério de Ferro, São Luiz do Maranhão (MA), ABM - Associação Brasileira de Metais e Metalurgia.
- [81] MORAES, C. C.; CASTRUCCI, P. L. **Engenharia de automação industrial.** LTC - Livros Técnicos e Científicos Ltda, 1ª edição, 2001.

- [82] PHILLIPS, C. L.; NAGLE, H. T. **Digital control system analysis and design**. Editor Prentice Hall, 1995.
- [83] MOTTA, R. S. N.; SOUZA, L. E.; BIRK W. **Advanced dynamic models for a pulverized coal injection plant**. 4th International Conference on Modelling and Simulation of Metallurgical Process in Steel Making (STELL SIM), 27 th June to 1st July 2011, Düsseldorf, Alemanha.
- [84] CARVALHO, M. A.; MOTTA, R. S. N. **Blast furnaces pulverized coal injection rate control development linked to production rhythm**. 5th Ironmaking Congress in Sweden, 2005.
- [85] MOTTA, R. S. N.; ARAÚJO, C. M. S.; NEVES, C. P.; GOMES M. W. **Evolução do transporte pneumático nas estações de dessulfuração em carro torpedo da CSN**. 61º Congresso da ABM, Rio de Janeiro, jun. 2006.
- [86] CARVALHO, A. J. C; FERNANDES E. A. **Aplicações de sistema distribuídos de controle digital - SDCCD**. 6º Congresso Brasileiro de Automática, Belo Horizonte, 1986.