



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 P _{máx}	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