

**FLAVIO DA SILVA VITORINO GOMES**

**FERRAMENTA PREDITIVA PARA O NÍVEL DE LÍQUIDOS EM  
CADINHOS DE ALTOS-FORNOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro Tecnológico da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Elétrica, na área de concentração em Automação. Orientador: Prof. Dr. José Leandro Felix Salles. Co-orientadora: Profa. Dra. Jussara Farias Fardin.

**VITÓRIA**

**2010**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Central da Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)

---

G633f Gomes, Flávio da Silva Vitorino, 1978-  
Ferramenta preditiva para o nível de líquidos em cadinhos de  
altos-fornos / Flávio da Silva Vitorino Gomes. – 2010.  
119 f. : il.

Orientador: José Leandro Félix Salles.  
Co-Orientadora: Jussara Farias Fardin.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Altos-fornos. 2. Força eletromotriz. 3. Análise de séries  
temporais. 4. Previsão. I. Salles, José Leandro Félix. II. Fardin,  
Jussara Farias. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro  
Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

---

**FLAVIO DA SILVA VITORINO GOMES**

**FERRAMENTA PREDITIVA PARA O NÍVEL DE LÍQUIDOS EM  
CADINHOS DE ALTOS-FORNOS**

COMISSÃO EXAMINADORA

---

Prof. Dr. José Leandro Felix Salles  
Universidade Federal do Espírito Santo - Orientador

---

Profa. Dra. Jussara Farias Fardin  
Universidade Federal do Espírito Santo - Co-orientadora

---

Prof. Dr. Rodrigo Varejão Andreão  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Espírito Santo –  
Membro Interno

---

Prof. Dr. Reinaldo Castro Souza  
Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro - Membro Externo

Vitória, 14 de Dezembro de 2010

*À minha esposa, Isabele Beserra Santos  
Gomes e filha Camila Santos Gomes.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que sempre me indica os caminhos a trilhar e me dá forças para ultrapassar os obstáculos da vida.

Aos meus pais, João e Maria, meu irmão Érico, minha esposa Isabele, minha filha Camila, e a toda minha família que, com muito carinho, confiança e apoio, não mediram esforços para que chegasse até esta etapa de minha vida.

À ArcelorMittal Tubarão (ex- Companhia Siderúrgica de Tubarão – CST), por todo o apoio e suporte, que serviram para estimular a minha especialização na área de automação aplicada ao processo de alto-forno.

Ao engenheiro e gestor Douglas Ruy, profundo incentivador de minha capacitação, cujo apoio e visão estratégica me possibilitaram seguir adiante com este projeto.

Ao professor orientador Dr. José Leandro pelo apoio, incentivo, paciência e, principalmente, pela disponibilização de tempo neste projeto, que tornaram possível a conclusão desta dissertação.

À professora orientadora Dra. Jussara Fardin por seu apoio e inspiração durante o nascimento e amadurecimento das idéias que me levaram à execução e conclusão desta dissertação.

A todos os professores da UFES do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, que foram tão importantes na transmissão dos conhecimentos e ferramentas que me permitiram o desenvolvimento desta dissertação.

*"Um homem é um sucesso se pula da cama de manhã, vai dormir à noite e nesse meio tempo, só faz o que gosta."*

*(Bob Dylan)*

## RESUMO

Neste trabalho é apresentado um sistema de monitoração do nível dos líquidos no cadinho do alto-forno através de monitoração da força-eletromotriz, ou FEM, gerada na carcaça deste equipamento. Também são apresentados os procedimentos de instalação dos sensores para a captura da FEM, o tratamento do sinal a fim de torná-lo estacionário, independente do estado termo-químico do cadinho e altamente correlacionado com o nível. Além disso, é realizada a modelagem do sinal através de séries temporais utilizando a metodologia Box & Jenkins. Por fim, com a utilização do modelo encontrado, foi realizada a previsão do comportamento do sinal 30 minutos à frente.

A principal contribuição desta dissertação de mestrado é a proposição de uma estratégia para a análise, identificação, filtragem e estimação dos sinais FEM através de modelos ARIMA obtendo-se ao final do processo uma previsão, com boa precisão, de 30 minutos do nível dos líquidos no interior do cadinho.

**Palavras-chave:** Alto-forno, Cadinho, Nível, Força-eletromotriz, Séries Temporais, Predição.

## ABSTRACT

This dissertation presents a system for monitoring the level of liquid in the hearth of the blast furnace by monitoring the electromotive force, or EMF, generated in the blast furnace shell. Also shown are the procedures for installation of sensors to capture the signal, the signal processing in order to make it stationary, independent of the thermo-chemical state of the hearth and highly correlated with the level. Further, it is performed through the modeling of the signal time-series using Box & Jenkins methodology. Finally, using the model found, it was used to predict the behavior of the signal 30 minutes ahead.

The main contribution of this dissertation is to propose a strategy for analysis, identification, filtering and estimation of EMF signals through ARIMA models resulting on a accurate forecast for 30 minutes of the liquid level inside hearth.

**Keywords:** Blast furnace, Hearth, Level, Electromotive force, Time Series, Prediction.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - O processo do alto-forno.....	23
Figura 02 – Visão geral de um alto-forno.....	23
Figura 03 – Representação esquemática dos óxidos de ferro em função da temperatura no interior do alto-forno .....	27
Figura 04 – Cadinho de um alto-forno.....	29
Figura 05 – Padrão típico de operação de casa de corrida de um alto-forno.....	31
Figura 06 – Circuito elétrico equivalente à geração de FEM na carcaça de um alto-forno.....	33
Figura 07 – Comportamento da FEM medida em relação ao esgotamento dos líquidos no cadinho .....	36
Figura 08 – Identificação de problemas de esgotamento do cadinho pela FEM. ....	38
Figura 09 – Filtro linear, com entrada $a_t$ , saída $Z_t$ e função de transferência $\psi(z-1)$ .....	48
Figura 10 – Gráfico amplitude x média.....	53
Figura 11 – ACF de processos AR(1) .....	54
Figura 12 – ACF de processos MA(2).....	54
Figura 13 – ACF de processos ARMA(1).....	54
Figura 14 – Exemplo de Teste de Hipóteses.....	64
Figura 15 – Visão panorâmica do Alto-Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão.....	68
Figura 16 – Disposição física dos sensores nos furos de gusa do Alto-Forno 3. ....	69
Figura 17 - Detalhe de instalação dos sensores nos furos de gusa do alto-forno.....	69
Figura 18- Detalhes da instalação do sistema de transmissão <i>wireless</i> (transmissor, <i>gateway</i> e cartão Modbus). ....	70
Figura 19 – Tela de programação dos blocos de controle regulatório do sistema de monitoração de nível dos líquidos.....	71
Figura 20 - Comportamento da FEM medida na carcaça do Alto-Forno 3.....	72
Figura 21 – Dados para modelagem da FEM através modelo ARMAX. ....	73
Figura 22 – Modelagem da FEM através de sistema MISO.....	74
Figura 23 – Análise Temporal da FEM.....	75
Figura 24 – Transformada de Fourier da FEM.....	76
Figura 25 – Transformada de Fourier da FEM - Detalhes.....	76
Figura 26 – Filtragem do sinal de líquidos via filtros de 1ª ordem. ....	77

Figura 27 – Desempenho do sinal filtrado da FEM no domínio do tempo.....	77
Figura 28 – Desempenho do sinal filtrado da FEM no domínio da frequência .....	77
Figura 29– Comportamento do sinal filtrado da FEM durante uma parada na produção do alto-forno. ....	78
Figura 30 –Comportamento do sinal filtrado da FEM durante uma instabilidade operacional do alto-forno.....	79
Figura 31 – Análise descritiva do sinal de nível de líquidos do alto-forno .....	80
Figura 32 – Avaliação de estabilidade do sinal de nível de líquidos.....	80
Figura 33 – Autocorrelação do sinal de nível de líquidos do alto-forno. ....	81
Figura 34 – Autocorrelação parcial do sinal de nível de líquidos do alto-forno.....	81
Figura 35 – Raízes do polinômio AR(8) do nível dos líquidos.....	82
Figura 36 – Simulação de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente. ....	82
Figura 37 – Resíduos de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente.....	83
Figura 38– Autocorrelações dos resíduos de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente.....	83
Figura 39 – Simulação de previsão do modelo AR(15) para 30 minutos à frente. ....	84
Figura 40 – Simulação de resíduo da previsão do modelo AR(15) para 30 minutos à frente. ....	84
Figura 41 – Simulação de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.....	85
Figura 42– Simulação de resíduo da previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente .....	85
Figura 43 – Resultados reais de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente .....	86
Figura 44 – Resultados reais de resíduo da previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.....	87
Figura 45– Autocorrelações dos resíduos reais de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.....	87
Figura 46– Arquitetura SDCCD Alto-Forno 3.....	97
Figura 47– Configuração do SDCCD Alto-Forno 3 .....	97
Figura 48– Estação de Controle do SDCCD Alto-Forno 3 .....	98
Figura 49– Blocos de Controle do SDCCD Alto-Forno 3 .....	98
Figura 50– Blocos de Cálculo do SDCCD Alto-Forno 3.....	99
Figura 51– Blocos de Controle Sequencial do SDCCD Alto-Forno 3.....	99

## LISTA DE TABELAS

Tabela 01 – Composição típica do gusa e da escória.....	28
Tabela 02 - Principais características das ACF e PACF de modelos AR, MA e ARMA.....	56
Tabela 03 - Correlação entre entradas e saída para modelo ARMAX .....	70

## NOMENCLATURA

### Caracteres Latinos

Símbolo	Descrição
$Z_T$	variável aleatória
$a_T$	ruído branco
$dZ_T$	derivada de $Z_T$
cov	covariância
E	esperança
var	variância
k	tempo de amostragem discreto
p	ordem do modelo AR
q	ordem do modelo MA
i	ordem do modelo I
F	função de parâmetros da equação diofantina
G	função de parâmetros da equação diofantina

### Caracteres Gregos

Símbolo	Descrição
$\sigma$	desvio padrão
$\gamma_{0T}$	variância de $Z_T$
$\pi$	constante igual a 3,1416
$\mu$	média incondicional do sinal $Z_T$
$\gamma_k$	autovariância de $Z_T$ em relação ao instante k
$\phi$	vetor de parâmetros do modelo Box & Jenkins
$\Psi(Z^{-1})$	filtro linear do modelo Box & Jenkins
$\theta$	vetor de parâmetros do modelo MA
$\phi$	vetor de parâmetros do modelo AR
$\Delta$	diferenciação de variável ( ex $\Delta Z_T = Z_T - Z_{T-1}$ )
$\Sigma$	somatório
$\rho$	autocorrelação
$\xi$	função ARMA dependente de $\phi$ , $\theta$ e $\sigma$ .
$\lambda$	constante de ajuste da equação diofantina

### Caracteres Sobrescritos

Símbolo	Descrição
$\sim$	denota valor da variável aleatória subtraída a média desta
$\hat{\phantom{x}}$	denota valor estimado da variável aleatória
$T$	transposta de matriz

## Caracteres Subscritos

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>
<i>t</i>	operador atraso
<i>k</i>	operador atraso

## Siglas

<b>Caracteres</b>	<b>Descrição</b>
FEM	força-eletromotriz
ARIMA	<i>autoregressive integrated moving average model</i>
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
PCI	<i>pulverized coal injection</i>
ARMA	<i>autoregressive moving average model</i>
AR	<i>Autoregressive model</i>
MA	<i>moving average model</i>
ACF	<i>autocorrelation function</i>
PACF	<i>parcial autocorrelation function</i>
ARMAX	<i>autoregressive moving average model with exogen input</i>
SDCD	sistema digital de controle distribuido
SFCB	<i>sequential function control block</i>
MISO	<i>multiple input single output</i>
DTF	<i>Discrete Transform Fourier</i>
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>

# SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>16</b>
1.1	MOTIVAÇÃO	17
1.2	OBJETIVOS	18
1.3	ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	19
<b>2</b>	<b>CONCEITOS GERAIS</b>	<b>20</b>
2.1	INTRODUÇÃO	21
2.2	O PROCESSO DE PRODUÇÃO DE GUSA NO ALTO-FORNO	22
2.2.1	Reações físico-químicas no alto-forno	26
2.3	O CADINHO DO ALTO-FORNO	28
2.4	FORÇA-ELETROMOTRIZ GERADA NA CARÇA DO ALTO-FORNO	31
2.4.1	Processo de esgotamento do cadinho e a FEM	37
2.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	40
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA – SÉRIES TEMPORAIS</b>	<b>41</b>
3.1	INTRODUÇÃO	42
3.2	DEFINIÇÕES GERAIS	43
3.2.1	Esperança de processos estocásticos	43
3.2.2	Autocovariância	45
3.2.3	Autocorrelação	45
3.2.4	Estacionaridade	45
3.2.5	Ruído branco	46
3.3	TIPOS DE MODELO	46
3.3.1	Definição de Modelos ARIMA	47
3.3.2	Modelos autoregressivos (AR)	49
3.3.3	Modelos médias móveis (MA)	49
3.3.4	Modelos integrados (I)	50
3.3.5	Modelos autoregressivos, integrados e de médias móveis (ARIMA)	50
3.3.6	Modelos autoregressivos, integrados e de médias móveis com entradas exógenas (ARIMAX)	50
3.4	IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS ARIMA	51
3.4.1	Teste de estacionaridade	52
3.4.2	Função de autocorrelação	53
3.4.3	Função de autocorrelação parcial	55
3.4.4	Estimação de parâmetros	56
3.4.5	Transformada discreta de Fourier	57
3.5	IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS COM ENTRADA EXÓGENA	59
3.6	PREVISÃO DE MODELOS ARIMA	61
3.7	VALIDAÇÃO DE MODELOS ARIMA	62
3.7.1	Erro médio quadrático de previsão	63
3.7.2	Testes com base na análise residual	63

3.7.3 Testes de sobrefixação.....	63
3.7.4 Testes de Hipótese .....	64
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
4.1 INTRODUÇÃO .....	67
4.2 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.....	68
4.3 MODELAGEM DA FEM POR MODELOS ARMAX .....	72
4.4 EXTRAÇÃO DO SINAL DE NÍVEL DE LÍQUIDOS DA FEM .....	74
4.5 MODELAGEM DO NÍVEL DOS LÍQUIDOS POR SÉRIES TEMPORAIS .....	79
4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO.....	83
4.7 PREVISÃO DO NÍVEL DE LÍQUIDOS DO CADINHO.....	86
<b>5 CONCLUSÃO.....</b>	<b>89</b>
<b>6 REFERÊNCIAS.....</b>	<b>92</b>
<b>ANEXO A – SISTEMA DE CONTROLE DO ALTO-FORNO 3.....</b>	<b>96</b>
<b>ANEXO B – SISTEMA DE TRANSMISSÃO WIRELESS.....</b>	<b>109</b>

Two thick, parallel vertical black lines extend from the top to the bottom of the page, framing the central text.

# **INTRODUÇÃO**

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 MOTIVAÇÃO

No processo de produção de aço, o alto-forno desempenha um papel fundamental pois é o local onde o minério de ferro e os combustíveis reductores (carvão ou coque) são transformados em ferro-gusa ( $Fe > 96\%$ ), escória ( $CaO$ ,  $MgO$ ,  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ , entre outros) e gás de alto-forno ( $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ , entre outros). O gusa se forma pela redução do minério de ferro (processo onde há a obtenção de ferro-gusa com composição química de quase 100%) enquanto que a escória, se forma a partir da aglomeração dos minerais e das cinzas provenientes do coque ou carvão. O gusa e a escória não se misturam, ocupando áreas separadas na parte inferior do alto-forno (cadinho) pois possuem densidades distintas.

O escoamento de gusa e escória no interior do cadinho de um alto-forno tem importante função no processo produtivo. Esse fenômeno envolve o transporte de massa e energia, e afeta a distribuição do fluxo gasoso. Em geral, esses líquidos sofrem transformações físico-químicas, e são redistribuídos radialmente durante a descida para o cadinho. O nível dos líquidos no cadinho afeta o processo de produção do alto-forno de duas formas: (1) os líquidos no cadinho afetam a descida de carga, ou seja, quanto mais alto for o nível do líquido, mais fortemente o coque submerso empurrará a carga em sentido ascendente; (2) se a escória alcançar o nível das ventaneiras (entradas de ar) e não puder ser drenada, o fluxo de gás será severamente afetado, causando desde um resfriamento do forno até uma obstrução total das ventaneiras demandando uma parada na planta para reparos.

A operação ideal do esgotamento do cadinho para um alto-forno grande e de alta produtividade é o vazamento contínuo, de forma alternada, com tempos de vazamentos semelhantes para as corridas e um fluxo de escória quase contínuo. As vazões de gusa e escória de um furo-de-gusa (local por onde são

extraídos os materiais) dependem das características físico-químicas do gusa e escória, do comprimento e diâmetro do furo-de-gusa e da pressão interna do forno. Uma vez que o furo se desgasta continuamente, aumentando a vazão, é necessário o fechamento dos furos, de tempos em tempos, evitando um contato direto entre as ventaneiras e os furos-de-gusa (sopro de gás).

O esgotamento do ferro-gusa do cadinho do alto-forno é um procedimento inerente à atividade produtiva, mas que diminui a vida útil do refratário nesta região, uma vez que envolve impactos e vibrações elevados nas paredes do alto-forno. Hoje, o processo de esgotamento do cadinho é feito a partir de experiência operacional com um grau de incerteza elevado devido à subjetividade envolvida em relação ao nível dos líquidos no cadinho. O desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie na tomada de decisão sobre o instante de abertura do furo e seu tamponamento contribuirá para tornar esta operação mais confiável e assertiva trazendo, conseqüentemente, uma otimização do processo com ganhos financeiros relevantes.

O mais promissor sistema de monitoração do nível dos líquidos em altos fornos é a medição da força eletromotriz gerada na carcaça do alto-forno. Porém, a medição e técnicas de interpretação deste sinal não evoluíram o suficiente para que o sistema fosse confiável o bastante para servir de base para uma otimização da operação e alterações na estratégia de esgotamento dos altos-fornos.

## **1.2 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho é a implantação de um sistema para medição do nível dos líquidos com base na força-eletromotriz gerada na carcaça do alto-forno e de previsão de 30 minutos desta variável (aproximadamente 1/3 do processo de abertura/fechamento do furo-de-gusa e tempo que permite uma atuação efetiva em caso de necessidade). Para isso, objetiva-se a instalação de sensores na carcaça do alto-forno para captação da FEM, melhorar a

correlação deste sinal com o processo no interior do cadinho, modelar o sinal através de modelos Box&Jenkins e finalmente, realizar a previsão de 30 minutos do comportamento dos líquidos no interior da planta visando melhor controle do processo de abertura e fechamento dos furos-de-gusa, trazendo, como consequência, ganhos qualitativos e quantitativos relevantes.

Este trabalho visa a implantação de um sistema de previsão do nível dos líquidos no interior do alto-forno com base em modelos caixa-preta (modelagem que não utiliza equações físico-químicas do processo) pois é premissa a busca por uma metodologia que possa ser utilizada em altos-fornos sistemicamente e sem a necessidade de profundos conhecimentos a respeito do processo e suas nuances, como por exemplo, as complexas reações que ocorrem no interior da planta.

### **1.3 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO**

O texto está organizado da seguinte forma: No capítulo 2 é realizada uma descrição sucinta do processo de produção do ferro-gusa e o fenômeno gerador da força-eletromotriz na carcaça, além da sua relação com o processo. No capítulo 3 são apresentadas as ferramentas matemáticas utilizadas durante a modelagem do nível por meio da análise de séries temporais. No capítulo 4 tem-se a descrição detalhada de todo o desenvolvimento do sistema de medição de nível no processo produtivo, assim como os resultados obtidos em cada uma das etapas do trabalho; Finalmente, no Capítulo 5 ressaltam-se os resultados do trabalho e também alguns possíveis caminhos para continuação das análises e desenvolvimentos de trabalhos futuros.



# **CONCEITOS GERAIS**



## 2 CONCEITOS GERAIS

### 2.1 INTRODUÇÃO

Existem duas alternativas possíveis para a fabricação de produtos de aço: a combinação dos processos de alto-forno com posterior refinamento com oxigênio na aciaria ou no processo de produção em aciarias de fornos elétricos. Ambas as alternativas diferem respectivamente quanto ao tipo de produtos obtidos bem como a matéria prima utilizada. No processo de alto-forno, o minério de ferro e os combustíveis redutores (carvão ou coque) são transformados em ferro-gusa ou gusa, escória e gás. O gusa se forma pela redução do minério de ferro enquanto a escória se forma a partir da aglomeração dos minerais e das cinzas provenientes do coque ou carvão. O gusa e a escória não se misturam, ocupando áreas separadas no cadinho do alto-forno pois possuem densidades distintas (GEERDES *et al*, 2007).

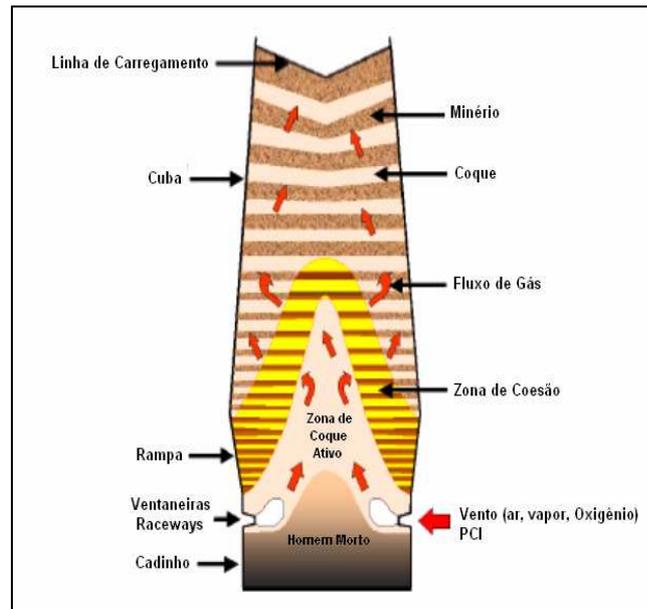
As matérias-primas do gusa (sinter, coque, minério e pelota) são carregadas pela parte superior do alto-forno, enquanto que o combustível adicional é injetado pelas ventaneiras. A carga desce regularmente devido à pequena granulometria da matéria-prima que faz com que o gás flua uniformemente, aumentando o contato com os sólidos em descida. Durante a descida, parte da carga de ferro assentada, reage com os gases redutores que sobem, reduzindo-se parcialmente os óxidos de ferro. Quando a temperatura é alta o bastante o ferro (óxido) inicia o amolecimento e eventualmente se funde. O fundido (ferro e escória) e o coque remanescente se estabelecem na parte mais baixa do forno: o cadinho. O coque remanescente forma uma camada porosa denominada de homem morto (*deadman*). Por perfurações nos furos-de-gusa, o cadinho é esvaziado. O metal quente líquido é então vazado em carros-torpedo e transferido para a aciaria (próxima planta no processo siderúrgico) onde se transformará em diversos tipos de aço (POST *et at*, 2003).

## 2.2 O PROCESSO DE PRODUÇÃO DO FERRO-GUSA NO ALTO-FORNO

O alto-forno pode ser considerado um trocador de calor e de massa em contracorrente. O gás sobe pelo forno, enquanto a carga e o coque descem. O gás transfere calor para a carga e simultaneamente o oxigênio é transferido para o gás. Esta característica de processo em contracorrente é bastante eficiente.

O processo pode ser descrito da seguinte forma (GEERDES *et al*, 2007).:

- Um alto-forno é carregado em camadas alternadas de coque e materiais que contêm ferro, conforme pode ser visto na Figura 01;
- Insufla-se ar quente dentro do alto-forno por meio de ventaneiras. Uma ventaneira é um equipamento de cobre refrigerado por água que canaliza o ar quente (a mais de 1200°C) no interior do alto-forno na região denominada *raceway*;
- O ar quente gaseifica os combustíveis e comburentes (coque, ar, carvão, vapor, oxigênio, entre outros) através das ventaneiras. Neste processo, o oxigênio do ar se transforma em monóxido de carbono (CO). Este gás resultante tem alta temperatura de chama (acima de 2000°C) que consome o coque em frente às ventaneiras criando um vazios;
- O gás quente ascende através do forno, realizando um grande número de funções:
  - i. Aquecimento do coque na área do ventre;
  - ii. Fusão da carga de minério de ferro criando vazios;
  - iii. Aquecimento do material na cuba do alto-forno;
  - iv. Eliminação de parte do oxigênio da carga através de reações químicas nas zonas de coesão;
  - v. Ao fundir-se, o minério de ferro gera gusa e escória, que gotejam na zona de coque até o cadinho, que é retirado através de orifícios na carcaça do alto-forno, denominado furo-de-gusa.

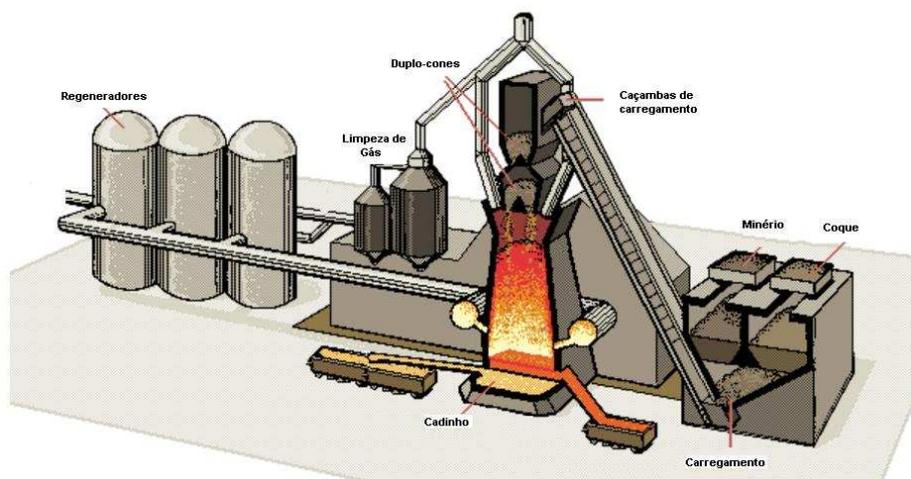


Fonte: WRIGHT *et al*, 2003.

Figura 01 – O processo do alto-forno

O alto-forno possui uma forma típica de segmentos tronco-cônicos e cilíndricos. As seções do topo para baixo são: a goela, onde se encontra a superfície da carga; a cuba; o ventre (rampa paralela); a rampa e o cadinho.

Uma visão geral dos principais equipamentos usados no processo de um alto-forno é apresentado na Figura 02. Estes equipamentos são descritos a seguir:



Fonte: [www.images.encarta.msn.com](http://www.images.encarta.msn.com), 2009.

Figura 02 – Visão geral de um alto-forno

1. Carregamento. Região onde se encontram os silos de abastecimento do forno. Nestes silos estão armazenados coque, minério de ferro, pelotas e fundentes. Estes são transportados para o topo do forno através de correias transportadoras ou caçambas de carregamento. É neste local onde são selecionadas as receitas (relações coque/minério) das cargas do alto-forno.
2. Topo do Forno. É por onde o forno é carregado. Como o alto-forno opera com pressão positiva em relação à pressão atmosférica (entre 1,5 e 3,0kg/cm<sup>2</sup>), o topo possui um sistema de pressurização /despressurização. Existem atualmente equipamentos com sistemas de duplo-cone e sistemas que operam com distribuidores rotativos (sem cone).
3. Limpeza de Gás. Equipamento responsável pela coleta dos gases gerados no processo assim como a retirada das partículas sólidas contidas nos gases (cinzas de coque) através de sistemas de lavagem e decantação. É nesta região que é realizado o controle de pressão do topo do alto-forno.
4. Casa-de-Corrída. Região do alto-forno onde é realizada a extração dos produtos finais do processo (gusa e escória) através de perfurações periódicas do cadinho do forno. Estes materiais são vazados em canais e separados por diferença de densidade. O gusa é então carregado em carros-torpedo ou carros-panela e transportado para a aciaria onde será transformado em aço.
5. Granulação de Escória. A escória, na maioria dos casos, é granulada, após resfriada com água. A escória granulada pode ser utilizada para fabricação de cimento ou asfalto rodoviário.
6. Regeneradores. São trocadores de calor responsáveis por realizar um pré-aquecimento do ar que será injetado no alto-forno. Este ar quente (temperatura de 1000~1300°C) é soprado através dos regeneradores

para o forno. Neste equipamento é realizado, também, o controle da umidade e quantidade de oxigênio do ar. O transporte do ar quente se dá através da linha de ar quente, anel de vento e ventaneiras.

7. Injeção de Carvão Pulverizado (PCI – do inglês *Pulverized Coal Injection*) - O uso de combustíveis auxiliares, que são injetados pelas ventaneiras, pode reduzir o custo do gusa. Os combustíveis auxiliares quase sempre são o carvão e o gás natural, porém o alcatrão e outros materiais podem também ser usados. No início dos anos 80 a injeção de óleo era mais comum. Isto mudou devido alteração dos preços relativos do carvão e óleo. O carvão é injetado por meio de lanças para dentro dos algaravizes, entra em ignição e é gaseificado. O equipamento de injeção de carvão pulverizado é formado pelos sistemas de armazenamento, moagem e transporte do carvão até o alto-forno.

A carga do alto-forno desloca-se de cima para baixo numa velocidade, em condições normais de operação, constante. Para que a carga desça, vazios são criados durante a queima do coque na frente das ventaneiras e na fusão dos materiais no interior do forno. Os fenômenos de “engaiolamento” (quando não há descida de carga) e “arriamentos” (descida rápida e descontrolada da carga) ocorrem quando há deficiências no processo de redução. As razões podem ser:

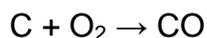
- i. A força ascendente está alta demais;
- ii. Temperatura alta demais de operação;
- iii. Alterações na operação da casa-de-corrída (podendo afetar nível do líquido e flutuação da camada de coque no interior do cadinho);
- iv. Contenção da força descendente pela fusão dos materiais em zonas indevidas.

A resistência à vazão de gás num alto-forno carregado está localizada nas camadas de minério, já que a permeabilidade do minério é 4 a 5 vezes inferior à permeabilidade das camadas de coque. A velocidade de subida do gás é bem baixa (entre 2 e 5m/s) mas pode atingir velocidades próximas dos 10m/s

no centro do alto-forno devido à maior concentração de coque nesta região. Podem existir situações que a fluidização do coque, e conseqüente elevação de velocidade de subida do gás, atinja a parte inferior do alto-forno ocasionando efeito chaminé (curto circuito entre o topo e a parte baixa do forno). Neste caso, o gás escapa com temperatura muito alta para o topo e com baixa utilização de seu potencial redutor (GEERDES *et al*, 2007).

### 2.2.1 REAÇÕES FÍSICO-QUÍMICAS NO ALTO-FORNO

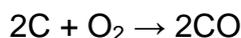
A principal reação para a operação de um alto-forno se dá entre o oxigênio do ar e o carbono do coque (FUJIHARA *et al*, 1994) que produz CO:



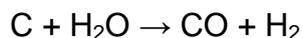
Se for considerada a região em frente à ventaneira, com excesso de carbono e elevada temperatura, tem-se:



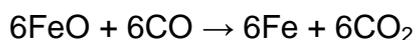
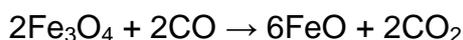
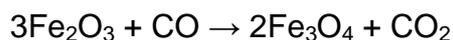
Pela lei de Hess (LEICESTER, 1951), tem-se:



O produto de reação (CO) irá ascender pelo alto-forno, reduzindo os óxidos. O calor gerado por essa reação irá aquecer e fundir os sólidos. Em frente à ventaneira, devido à presença de umidade no ar de sopro, tem-se a seguinte reação gerando um gás redutor diferente, que é o H<sub>2</sub>:

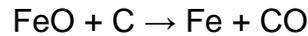
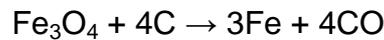
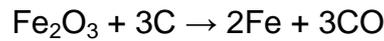


Além dessas equações, tem-se em frente às ventaneiras, a decomposição dos combustíveis auxiliares: óleo, alcatrão e/ou carvão gerando CO, H<sub>2</sub> e N<sub>2</sub> em porcentagens variáveis de acordo com as condições operacionais. O minério-de-ferro, de modo geral se encontra na forma de óxido. Assim, as reações de redução podem ser descritas da seguinte maneira:

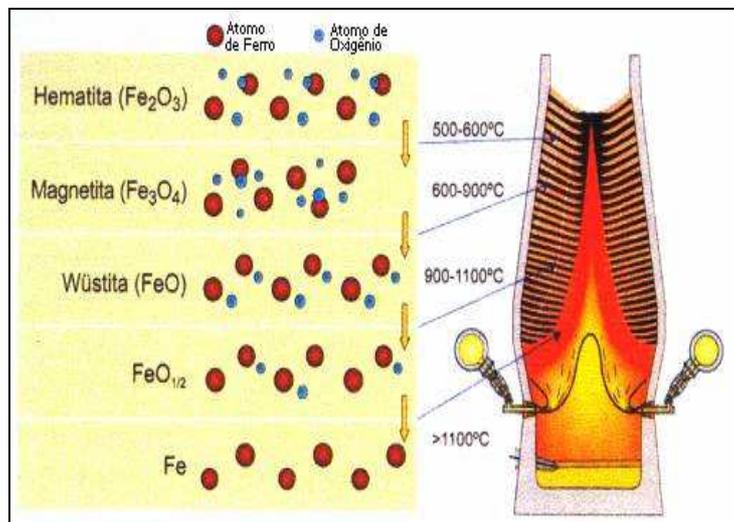


Estas reações são chamadas de reações de redução indireta e essas reações ocorrem inteiramente no estado sólido, sendo necessárias altas temperaturas

devido a certas reações serem endotérmicas. A redução do óxido-de-ferro pode se dar também através do redutor carbono, conforme abaixo:



Estas reações são chamadas de reações de redução direta. Também são reações endotérmicas e evoluem com o aumento de temperatura. Devido à condição de aquecimento da carga e redução pelo CO, basicamente não há ocorrência da redução direta dos óxidos  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ . Já a redução do FeO, devido as temperaturas envolvidas, se dá na região mais inferior da cuba, conforme pode ser visto na Figura 03.



Fonte: GEERDES *et al*, 2007.

Figura 03 – Representação esquemática dos óxidos de ferro em função da temperatura no interior do alto-forno

As composições do gusa e da escória são apresentadas na Tabela 01. O gusa é usado para produção de aço. Na aciaria, o gusa é ajustado para que se enquadre nos requerimentos metalúrgicos. O processo de refino consiste, basicamente, de dois passos: dessulfuração (retirada de enxofre do gusa) através de carbetos, cal ou magnésio e a remoção de carbono, silício, manganês e fósforo através de sopro de oxigênio.

Tabela 01 – Composição típica do gusa e da escória

Gusa			Escória		
	típico (%)	faixa(%)		típico (%)	faixa(%)
Fe	94,5	93~96	CaO	40	34~42
C	4,5	3,8~4,7	MgO	7	5~12
Si	0,4	0,3~0,47	SiO <sub>2</sub>	36	28~36
Mn	0,3	0,2~0,5	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12	8~20
P	0,07	0,03~1	soma	96,5	96~97
Ti	0,5	0,3~0,7	S	1	0,8~1,2

Fonte: GEERDES *et al*, 2007.

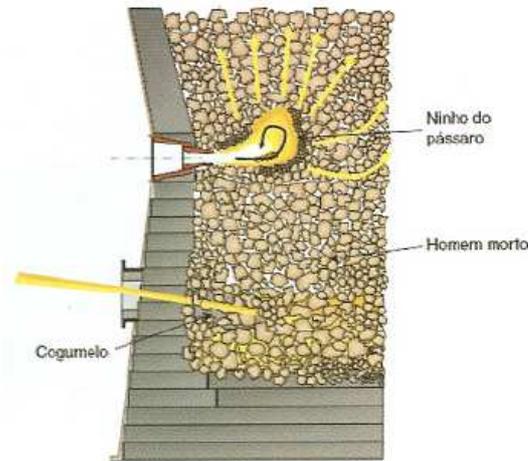
A composição final do gusa é o resultado de um processo complexo de interação metal-escória. Os vários elementos se dividem entre a escória e gusa líquidos. A dispersão de um elemento pelas duas fases depende da composição da escória e da temperatura do processo. Os óxidos de silício, manganês e fósforo são reduzidos através da reação de redução direta. A quantidade de silício e de manganês no gusa são indicativos do estado térmico do forno podendo ser utilizados para análise da consistência do processo.

A escória é formada a partir da carga, da cinza do coque e dos combustíveis auxiliares. Quatro componentes principais compõem aproximadamente 96% da escória (SiO<sub>2</sub>, MgO, CaO e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>). O balanço químico (para formarm 100%) vem de componentes tais como o óxido de manganês (MnO), enxofre (S), titânia (TiO<sub>2</sub>), potassa (K<sub>2</sub>O) e óxido de fósforo (P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>).

### 2.3 O CADINHO DO ALTO-FORNO

O gusa e a escória líquidos são recolhidos no cadinho do alto-forno, bem abaixo das ventaneiras. O gusa e a escória não se misturam: a escória possui uma densidade mais baixa (2,3t/m<sup>3</sup>) do que o gusa (7,2t/m<sup>3</sup>) e flutua sobre ele. Na Figura 04 pode ser visualizada uma representação esquemática de um

cadinho e o furo-de-gusa. O furo-de-gusa é uma peça refratária. Pelo lado de dentro do furo-de-gusa é criado um “cogumelo” refratário com massa de fechamento do furo-de-gusa solidificada.



Fonte: GEERDES *et al*, 2007.

Figura 04 – Cadinho de um alto-forno

O alto-forno é vazado de 8 a 14 vezes por dia através do furo-de-gusa, o que corresponde a uma duração média de vazamento entre 1,5 e 3,0 horas. O tempo de residência da carga no interior do forno é de 5 a 6 horas. Assim, para um vazamento de 2 horas, aproximadamente 1/3 da carga do forno é extraída. O início de sopro de gás no furo-de-gusa indica cadinho “vazio”, sendo necessário o fechamento imediato pois o ar soprado pelas ventaneiras se conectou com o furo-de-gusa.

Os níveis dos líquidos no cadinho afetam o processo de produção do alto-forno de duas formas:

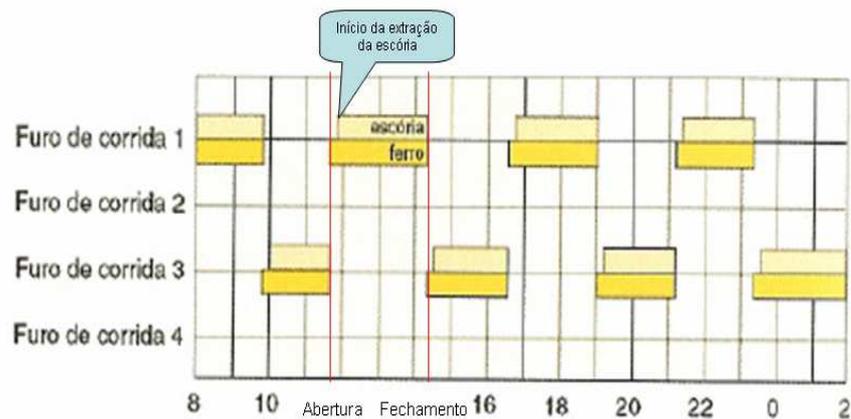
- Os líquidos no cadinho afetam a descida de carga: quanto mais alto for o nível do líquido, mais fortemente o coque submerso empurrará a carga em sentido ascendente.
- Se a escória alcançar o nível das ventaneiras e não puder ser drenada, o fluxo de gás será severamente afetado. Isto pode causar desde um resfriamento do forno até uma obstrução total das ventaneiras demandando uma parada na planta para reparos.

Sendo assim, o nível dos líquidos no cadinho tem que ser mantido sob controle e, se possível, constante e baixo. Mesmo com uma boa prática de casa de corrida existe uma variação no nível líquido do cadinho de até 1 metro no interior do alto-forno.

Um alto-forno moderno possui pelo menos 02 (dois) furos-de-gusa. Os fornos grandes com cadinhos com 14 metros de diâmetro, possuem geralmente 04 furos-de-gusa. O gusa é vazado no canal principal enquanto a escória escoá pelos canais secundários. O gusa e a escória são separados facilmente pela diferença de densidade. A maioria dos altos-fornos de alta produtividade são vazados de forma alternada e simétrica, ou seja, quando um furo-de-gusa é tamponado, o outro simetricamente oposto é aberto. O intervalo de tempo entre vazamentos pode ser reduzido a zero ou ocorrer aberturas paralelas em virtude de desvios operacionais.

A operação ideal da casa de corrida para um alto-forno grande e de alta produtividade é o vazamento contínuo, de forma alternada, com tempos de vazamentos semelhantes para as corridas e um fluxo de escória quase contínuo.

As vazões de gusa e escória de um furo-de-gusa dependem das características físico-químicos do gusa e escória, do comprimento e diâmetro do furo-de-gusa e da pressão interna do forno. Uma vez que o furo se desgasta continuamente, especialmente pelo ataque da escória, as vazões de gusa e escória não são constantes. Além disso, no início da corrida apenas o gusa é extraído. Um padrão típico de fluxo de vazamento pode ser visto na Figura 05.



Fonte: GEERDES *et al*, 2007.

Figura 05 – Padrão típico de operação de casa de corrida de um alto-forno

O esgotamento do ferro-gusa do cadinho do alto-forno é um procedimento inerente à atividade produtiva, mas que diminui a vida útil do refratário nesta região, uma vez que envolve impactos e vibrações elevados nas paredes do alto-forno. Atualmente, as aberturas dos furos-de-gusa são realizadas a partir de experiência operacional com incertezas elevadas devido ao grau de subjetividade envolvido no processo decisório. O objetivo da estimação do nível dos líquidos do cadinho é a melhoria do processo de abertura e fechamento dos furos-de-gusa como forma de se estabilizar a estrutura física dos furos-de-gusa e temperaturas de parede, preservando os refratários da região interna do furo e evitar interferências na distribuição de gás e descida de carga no alto-forno (NIGHTINGALE; TANZIL, 2001).

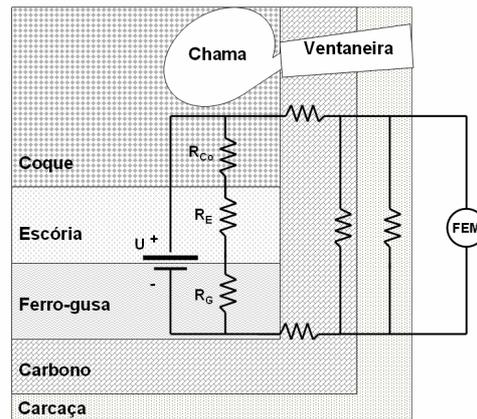
## 2.4 FORÇA-ELETROMOTRIZ GERADA NA CARÇAÇA DO ALTO-FORNO

Em virtude da atual demanda por uma operação segura, estável e com longas campanhas ininterruptas de produção, a permanente otimização da operação do alto-forno é, cada vez mais necessária. Em especial, há uma demanda clara por melhorias nas estratégias de esgotamento nos processos de altos-fornos. Os procedimentos existentes atualmente são baseados em regras simples que consistem no tempo entre aberturas dos furos-de-gusa e tempos em que a escória aparece nos canais de esgotamento (NIGHTINGALE; TANZIL, 2001).

Um dos sistemas de avaliação do nível dos líquidos em altos-fornos que vêm sendo utilizado em algumas plantas é a medição da força-eletromotriz gerada na carcaça do alto-forno, doravante chamada FEM. Porém, a medição e técnicas de interpretação deste sinal não evoluíram o suficiente para que o sistema fosse confiável o bastante para servir de base para uma otimização da operação e alterações na estratégia de esgotamento dos altos-fornos (PETERS *et al*, 2001).

As FEMs são produzidas devido aos processos químicos e térmicos que ocorrem no forno. Estes processos geram células elétricas na região devido a oxidação do ferro para formar o óxido de ferro e escória. A corrente produzida por estas células migra para a carcaça do forno através de zonas de diferentes resistências e gradientes de calor. A FEM medida na carcaça do alto-forno é indicativo do estado térmico e químico no interior do forno e também do nível dos líquidos no cadinho (RADILOV, 1985; DOROFEEV; NOVOKHATSKII, 1984; DUBOVIK *et al*, 1982 e RUFF, 1927).

Como pode ser visualizado na Figura 06, para um processo estável, a corrente e, conseqüentemente, a diferença de potencial que é medida na carcaça (FEM) varia de acordo com três componentes: a resistência da camada de coque ( $R_{Co}$ ), a resistência da camada de ferro-gusa ( $R_G$ ) e a escória ( $R_E$ ). Depois de esgotado, o cadinho é preenchido em sua grande parte por coque. Quando o nível de líquido no cadinho aumenta, o ferro e a escória fluem para o aglomerado de coque preenchendo os espaços entre eles. Isto causa uma elevação na resistência interna, principalmente devido à escória, e um correspondente aumento da FEM medida. Quando o alto-forno é esgotado, os níveis dos líquidos caem, a resistência interna cai e FEM medida decresce.



Fonte: DOROFEEV; NOVOKHATSKII, 1984.

Figura 06 – Circuito elétrico equivalente à geração de FEM na carcaça de um alto-forno

Com o alto-forno em uma dada condição operacional constante (parâmetros de sopro, limites químicos das matérias-primas, etc...),  $U$  deve permanecer relativamente constante e pode ser considerada como a FEM medida no final do esgotamento do cadinho (cadinho vazio). Mudanças neste valor são indicativos de mudanças na temperatura do metal e composição (particularmente Si e Mn). A tensão elétrica  $U$  irá mudar com o estado térmico do alto-forno, mas isto não é notado como uma alteração obrigatória de  $R_{co}$ . Contudo, a mudança do estado térmico do cadinho deve ser considerada quando for usado o sinal FEM para detecção de nível de líquidos no cadinho do alto-forno pois podem afetar a FEM medida (DOROFEEV; NOVOKHATSKII, 1984).

Alguns estudos como (DUBOVIK *et al*, 1984; BRAMMING; HALLIN, 1989) mostraram que a monitoração da variação da diferença entre FEMs por meio de 02 sensores, um sobre o nível do anel de vento e outro na região inferior do cadinho possui boa correlação com o nível dos líquidos no cadinho. A FEM medida mostra uma variação de longo prazo no nível mínimo (fim do esgotamento) e o nível máximo (início do esgotamento). Esta variação pode estar relacionada com variações na drenagem do cadinho ou pode ser o resultado de mudanças nos níveis térmicos do cadinho.

O sinal produzido pela FEM gerada entre os pontos inferior e superior do cadinho é muito pequeno (variações menores que 01 milivolt) e consiste num somatório de 03 componentes: básica, periódica e ruído (alta frequência). A primeira têm relação com o estado térmico do cadinho, a diferença de temperatura entre os pontos de medição e também com os componentes contidos no gusa e escória. A componente periódica é associada ao enchimento e esgotamento dos líquidos no cadinho. A última, por sua vez, é consequência do movimento de materiais no forno e deve ser filtrada do sistema (PRONIN, 1985).

É de conhecimento que alterações nos parâmetros do processo tais como vazão, pressão ou temperatura de sopro também afetam a FEM pois impactam diretamente na catalisação do processo de redução (LEBED *et al*, 1990).

Análises da FEM medida e das temperaturas nos pontos de medição da carcaça indicam claramente que as variações na FEM e a seqüência de esgotamento possuem frequências muito mais altas que as flutuações das temperaturas dos pontos de medição. A evolução da FEM não é correlacionada diretamente com a diferença de temperatura entre os pontos de medição da FEM. Contudo, esta temperatura pode ser utilizada para realização da correção do sinal puro da FEM medido pelos sensores, especialmente em caso de variações no estado térmico do cadinho (MIELENZ *et al*, 2008).

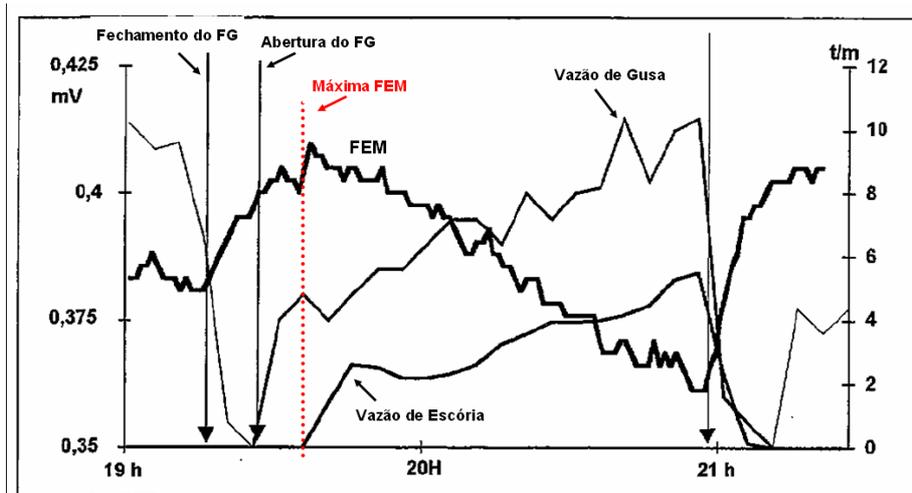
Deve-se considerar, também, a interferência devido à diferença de temperatura entre os pontos de conexão na carcaça e os cabos de medição conhecido como efeito termoelétrico, ou efeito Seebeck, no caso em que os equipamentos sejam feitos de materiais diferentes. Cabos de cobre, em especial, geram tensões termoelétricas excessivas e não devem ser utilizados para medições de FEM na carcaça do cadinho. A tensão termoelétrica gerada em junções aço/cobre é da ordem de  $7\mu\text{V}/^\circ\text{C}$ . Variações de 12 graus Celsius geram tensões próximas de  $100\mu\text{V}$  entre os sensores da FEM, ocasionando desvios significativos nos valores medidos. Sendo assim, recomenda-se a utilização de cabos baseados em ferro carbono pois outro material potencializaria este efeito, dificultando a análise. (PETERS *et al*, 2001).

Os sensores instalados na carcaça e sensores introduzidos nos blocos de carbono (camada refratária existente na região interna do cadinho) apresentam o mesmo comportamento, porém, a FEM medida no sensor do bloco de carbono apresenta maior amplitude (PETERS *et al*, 2001).

Em (PETERS *et al*, 2001) também se relata que, por tratar-se de medição elétrica de uma tensão muito pequena, podem ocorrer interferências elétricas tais como curtos-circuitos à terra de equipamentos elétricos próximos, máquinas de solda, entre outros. Contudo essas perturbações não são muito comuns e são de fácil identificação.

Correlações entre a concentração de Si e a FEM apresentadas em (LEBED *et al*, 1990), sugerem que o estado térmico do cadinho é diretamente proporcional ao valor FEM, ou seja, se o Si cai, a FEM medida também cai pois mudanças nas concentrações de Si no ferro-gusa são indicativos de alterações no estado térmico do alto-forno.

A Figura 07 mostra que a FEM tem boa correlação com a seqüência de esgotamento e com o nível do líquido no cadinho. Nesta figura, observa-se que durante o tempo entre duas corridas, o sinal FEM aumenta, indicando que o cadinho está enchendo. A FEM aumenta com o começo da corrida e decresce somente quando a escória começa a fluir do cadinho. Isto está relacionado com baixas taxas de esgotamento (<4t/min) sugerindo que a taxa de chegada do líquido no cadinho é maior que a taxa de extração. O início da saída da escória corresponde ao maior nível da FEM, por que reflete a maior resistência interna no circuito elétrico devido à camada de escória está no máximo e sua resistência ser muito elevada neste momento (LEBED *et al*, 1990).



Fonte: MIELENZ *et al*, 2008.

Figura 07 – Comportamento da FEM medida em relação ao esgotamento dos líquidos no cadinho.

De acordo com (LEBED *et al*, 1990, MIELENZ *et al*, 2008), uma boa relação entre a temperatura do gusa e a FEM pode ser obtida mas esta relação não é sempre verificada. Diferentes observações em processos industriais confirmaram que a série temporal da FEM possui variância não constante, ou seja, não é um sinal estacionário. Seu comportamento deve-se a dois fenômenos distintos, que ocorrem em duas faixas de frequências também distintas:

- Sinal de alta-freqüência que tem relação com a variação da resistência do circuito elétrico induzido pelas variações dos líquidos e suas quantidades. Este comportamento deve-se apenas às alterações das resistências  $R_G$  e  $R_E$  (ver Figura 06) que, por sua vez, dependem da altura da camada de líquidos (nível);
- Sinal de baixa-freqüência que tem relação com as modificações no estado global do cadinho (permeabilidade, carga, temperatura, etc...). Este comportamento deve-se a alterações da resistência  $R_{Co}$  (ver Figura 06), e também a velocidade de produção de elétrons na fonte geradora (ritmo operacional).

Ainda na Figura 07, no início da corrida, o diâmetro do furo-de-gusa corresponde ao diâmetro da broca utilizada na perfuratriz. Por isso, a vazão de esgotamento é pequena levando a uma continuidade do processo de enchimento do cadinho (taxa de produção de líquido maior que a taxa de extração). Durante a corrida, a área do furo-de-gusa se torna maior, ocasionando uma elevação na vazão de esgotamento. Com este acréscimo na vazão, o nível de enchimento do cadinho alcança o máximo e, tão logo a taxa de extração supere a taxa de produção, o nível cai.

Não foi encontrada, até o momento, nenhuma dependência clara entre alterações de parâmetros operacionais do alto-forno e a FEM. Contudo, o sinal parece ser influenciado pelas condições termoquímicas do cadinho. Um método eficiente de se contornar o problema é se criar uma estratégia de abertura dos furos-de-gusa com base apenas na análise da variação da FEM no intervalo entre poucas corridas (considerando apenas a componente de alta-freqüência do sinal). Outro método efetivo é a compensação da variação de longo prazo com a utilização da técnica de médias móveis temporais ou filtros passa-alta, resultando um sinal muito estável a longo prazo (MIELENZ *et al*, 2008).

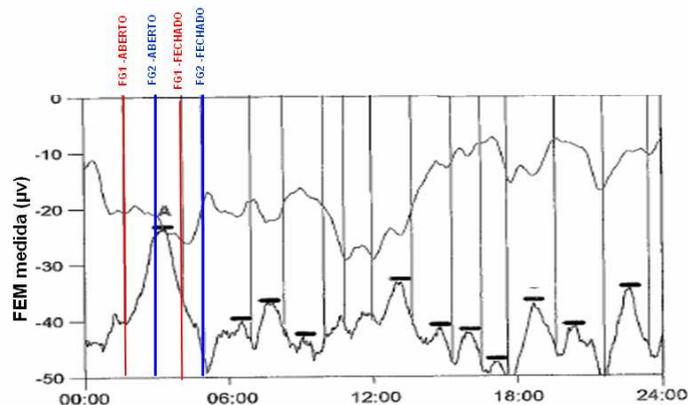
As variações da FEM em função da seqüência de abertura dos furos-de-gusa têm freqüência muito maior que as flutuações de temperatura nos pontos de contato. A evolução da FEM durante o esgotamento não está relacionado diretamente com a diferença de temperatura dos pontos de contato. Contudo, a informação desta temperatura pode ser utilizada para realizar a correção da FEM medida nos sensores, especialmente durante mudanças no estado térmico do cadinho (LEBED *et al*, 1990).

#### **2.4.1 PROCESSO DE ESGOTAMENTO DO CADINHO E A FEM**

A medição da FEM é uma ferramenta importante não somente para a medição no nível de enchimento do cadinho, mas também para a detecção de

condições críticas e ajustes na estratégia de abertura dos furos-de-gusa de acordo com as condições do cadinho.

Uma informação muito importante para uma boa estratégia de abertura dos furos-de-gusa do alto-forno é o ponto de mudança de inclinação na curva da FEM: Se o ponto de mudança não ocorre, o nível do líquido continuará subindo e uma abertura paralela dos furos-de-gusa deve ser realizada. Sendo assim, a FEM pode ser utilizada para ajudar na detecção de problemas de esgotamento do cadinho como podemos visualizar na Figura 08.



Fonte: PETERS *et al*, 2001.

Figura 08 – Identificação de problemas de esgotamento do cadinho pela FEM.

Nota-se claramente acima que, no pico A, o sinal FEM continuou subindo, mesmo após abertura do furo-de-gusa 01, indicando uma retenção anormal de líquidos. As ações corretivas foram a abertura do segundo furo-de-gusa em paralelo (furo-de-gusa 02) e a redução brusca da pressão de sopro durante a corrida permitindo uma maior vazão de extração (redução da interface de escória e o volume de escória no furo-de-gusa). Após estas ações, nota-se que nas corridas posteriores, o nível dos líquidos permaneceu oscilando em patamares normais de operação (PETERS *et al*, 2001).

Pela utilização da FEM, (MIELENZ *et al*, 2008) verificou que corridas paralelas (dois furos-de-gusa abertos ao mesmo tempo) de longa duração ou corridas com tempos reduzidos induzem fortes variações nos níveis de líquidos do cadinho. No entanto, a meta operacional é conseguir escoamento constante de metal líquido e escória, sem fortes variações nos níveis de líquido. Esta meta

foi alcançada em um alto-forno na Alemanha, reduzindo-se a velocidade de vazamento e encurtando-se o tempo de corridas paralelas. Isso por sua vez, levou a uma redução no número de corridas por dia para 7 ou 8 e prolongou-se o tempo de escoamento de escória para quase 98% do tempo total de corrida. A suavização do escoamento de gusa e escória, bem como a redução da velocidade de escoamento, levou a uma redução no desgaste do forro do cadinho. Além disso, a quantidade de perfurações e quantidades de material para fechamento dos furos-de-gusa foram reduzidos significativamente (MIELENZ *et al*, 2008).

Com a utilização de medições de vazão de saída de ferro-gusa e escória do alto-forno (medição de nível no carro torpedo e medição de pressão no sistema hidráulico do tambor de granulação, respectivamente) e taxas de produção instantâneas (baseados na análise de gás do topo e parâmetros de sopro), foi desenvolvido em (BRANNBACKA; SAXEN, 2004) um modelo caixa-branca (baseado em equações físico-químicas do processo) para estimação dos níveis de gusa e escória no cadinho do alto-forno. Este trabalho ressalta que o resultado a quantidade de ferro-gusa encontrada no cadinho tem forte correlação com a FEM medida na carcaça do alto-forno.

Em seguida, em (BRANNBACKA; SAXEN, 2005) foi desenvolvido um modelo avançado de monitoramento dos níveis de gusa e escória no cadinho do alto-forno com base nas quantidades extraídas de escória e gusa do alto-forno, nas diversas variáveis de processo e, também, na geometria do cadinho. Esta, é fornecida por um modelo de cobertura refratária e estimando-se o estado de flutuação do homem morto através de um balanço simples de forças. Um dos objetivos do trabalho era a predição do nível através da manipulação das equações dinâmicas do processo. Contudo, em virtude das variações do processo, esta previsão não apresentou bons resultados. Somente com a utilização de um filtro de Kalman estendido associado ao sinal FEM para correção do sinal, este problema foi contornado. O modelo é baseado em uma estimação ótima da correção do nível dos líquidos visando prevenir variações bruscas na saída do modelo. Para esta correção foi utilizado um modelo auto-regressivo de 1ª ordem para modelagem da FEM. Este modelo foi aplicado a

medições industriais e apresentou boas previsões para intervalos de até 15 minutos de previsão. Nota-se que os resultados demonstram a importância de se considerar o estado do cadinho no problema de estimação de líquidos. Em particular, o estado de flutuação do homem morto se demonstrou decisivo para os resultados.

## **2.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS**

Neste capítulo foram descritos o processo de produção de ferro-gusa com alto-forno, as partes que o compõem e os fenômenos que ocorrem no seu interior, desde o carregamento das matérias-primas (minério-de-ferro, coque e fundentes) até a saída dos produtos finais, ferro-gusa e escória.

Foi apresentado que o conhecimento e controle do nível dos líquidos no interior do cadinho do alto-forno é um importante parâmetro operacional, pois envolve a possibilidade de otimização de processos e, conseqüentemente, a redução de custos. O esgotamento do cadinho é realizado atualmente com base na experiência operacional pois, em virtude das condições adversas do processo, não há medição direta possível deste nível.

Existem vários estudos de monitoração do nível dos líquidos através da força eletromotriz gerada na carcaça. Contudo, em virtude das várias componentes que constituem o sinal (estado termoquímico do cadinho, parâmetros operacionais, etc.) ainda não foi possível a utilização deste sinal como base para tomada de decisão no processo produtivo, embora haja alguns estudos neste sentido.



**METODOLOGIA –  
SÉRIES TEMPORAIS**



### 3 METODOLOGIA - SÉRIES TEMPORAIS

#### 3.1 INTRODUÇÃO

As séries temporais sempre tiveram um importante papel nas ciências naturais. A astronomia babilônica utilizava séries temporais nas posições relativas das estrelas e planetas para prever eventos astronômicos. Observações dos movimentos dos planetas formaram a base das leis que Johannes Kepler formulou. Séries temporais podem ser definidas como pacotes de observações quantitativas arranjadas em ordem cronológica em que o tempo é considerado uma variável discreta.

A análise de séries temporais permite a detecção de regularidades nas observações das variáveis e encontrar a lei que as define. Através desta análise também é possível prever observações futuras com precisão. A idéia básica por trás dos procedimentos, que vem desde os babilônicos, é que é possível decompor as séries temporais em números finitos de componentes independentes que juntas apresentam regularidade e podem ser calculadas antecipadamente. Neste procedimento é necessário que haja diferentes fatores independentes impactando na variável.

A decomposição das séries temporais em componentes não observáveis dependentes de diferentes fatores causais foi utilizada sistematicamente na análise de séries temporais desenvolvida por Warren M. Persons em 1919. Ele identificou e separou as séries temporais em quatro componentes: Componente de longo prazo, ou *trend*; Componente cíclica com períodos de mais de um ano, ou ciclo de negócios; Componente que contém subidas e descidas no ano, ou ciclo sazonal e componente que contém comportamentos que não se enquadram nas demais, ou resíduo.

No final do século 20, uma visão totalmente diferente foi largamente difundida utilizando-se de análises estatísticas das séries temporais. Os procedimentos descritivos da análise clássica de séries temporais foi abandonado e, em seu lugar, surgiram resultados provenientes de métodos de teorias probabilísticas e estatísticas. Destes, surgiram as regras de processos estocásticos que seriam utilizadas largamente na análise de séries temporais. Esta nova metodologia de análise de séries temporais as considerava como uma realização de um processo estocástico focando-se nos termos não-determinísticos como estruturas complexas e dependentes. Os primeiros passos foram dados por EVGENIJ EVGENIEVICH SLUTZKY e GEORGE UDNY YULE no começo do século 20, que começaram a representar as séries como somas de processos estocásticos através de médias móveis e processos auto-regressivos. Esta prática foi amplamente divulgada por GEORGE E.P. BOX e GWILYM M. JENKINS em 1970 que desenvolveram métodos empíricos de implementação destas regras.

## 3.2 DEFINIÇÕES GERAIS

### 3.2.1 Esperança de Processos Estocásticos

Suponha uma amostra observada de tamanho  $T$  da variável aleatória  $Z_t$ :

$$\{Z_1, Z_2, \dots, Z_T\}. \quad (3.1)$$

Considere agora uma coleção de  $T$  variáveis independentes e identicamente distribuídas  $a_T$ ,

$$\{a_1, a_2, \dots, a_T\}, \quad (3.2)$$

com,

$$a_T \sim N(0, \sigma^2).$$

Sendo  $N$  é a distribuição normal e  $\sigma$  o desvio padrão.

Isto se refere a uma amostra de tamanho  $T$  de um processo ruído gaussiano branco. A amostra observada em (3.1) representa  $T$  números particulares, mas o conjunto de  $T$  números representados é somente uma possível saída do

processo estocástico que gerou a amostra. Se for imaginada a observação do processo por um período infinito de tempo, tem-se a seguinte seqüência:

$$\{Z_t\}_{t=-\infty}^{\infty} = \{\dots, Z_{-1}, Z_0, Z_1, Z_2, \dots, Z_T, Z_{T+1}, Z_{T+2}, \dots\}, \quad (3.3)$$

Esta seqüência infinita  $\{Z_t\}_{t=-\infty}^{\infty}$  pode ser vista como uma simples realização de um processo de séries temporais. Por exemplo, se colocarmos um computador para gerar uma seqüência infinita com  $N(0, \sigma^2)$ ,  $\{a_t^{(1)}\}_{t=-\infty}^{\infty}$  e um segundo computador gerando uma nova seqüência  $\{a_t^{(2)}\}_{t=-\infty}^{\infty}$  veremos que estas duas serão realizações independentes de um processo tipo ruído branco, que será explicado posteriormente.

Imagine uma seqüência de tamanho  $I$  gerada a partir das seqüências  $\{Z_t^{(1)}\}_{t=-\infty}^{\infty}$ ,  $\{Z_t^{(2)}\}_{t=-\infty}^{\infty}, \dots, \{Z_t^{(I)}\}_{t=-\infty}^{\infty}$ , e considere a seleção de observações associadas ao tempo  $t$  de cada seqüência:

$$\{Z_t^{(1)}, Z_t^{(2)}, \dots, Z_t^{(I)}\}. \quad (3.4)$$

Esta sequencia pode ser descrita como uma amostra de  $I$  realizações de uma variável  $Z_t$ . Esta variável aleatória possui uma determinada densidade de probabilidade, denotada como  $f_{Z_t}(Z_t)$ , que é conhecida como densidade condicional de  $Z_t$ . Por exemplo, para um processo gaussiano ruído branco, esta densidade é dada por:

$$f_{Z_t}(Z_t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp\left[-\frac{Z_t^2}{2\sigma^2}\right]. \quad (3.5)$$

A esperança da  $t$ -ésima observação de uma série temporal refere-se à média da sua distribuição de probabilidade, ou seja:

$$E(Z_t) = \int_{-\infty}^{\infty} Z_t f_{Z_t}(Z_t) dZ_t, \quad (3.6)$$

Pode-se referir à esperança  $E(Z_t)$  como a média incondicional de  $Z_t$  ou  $\mu_t$ :

$$E(Z_t) = \mu_t \quad (3.7)$$

A variância da variável aleatória  $Z_t$  (denotada por  $\gamma_{0t}$ ) é similarmente definida como (HAMILTON, 1994):

$$\gamma_{0t} = E(Z_t - \mu_t)^2 = \int_{-\infty}^{\infty} (Z_t - \mu_t)^2 f_{Z_t}(Z_t) dZ_t, \quad (3.8)$$

correspondendo à dispersão das amostras em relação à seu valor esperado  $\mu_t$ .

### 3.2.2 Autocovariância

A autocovariância de lag “k” é definida como a covariância entre  $Z_t$  e  $Z_{t+k}$ , ou seja:

$$\gamma_k = Cov(Z_t, Z_{t+k}) = E[(Z_t - \mu_t)(Z_{t+k} - \mu_{t+k})] \text{ para } k=0,1,2,\dots \quad (3.9)$$

Notemos que,  $\gamma_0 = var(Z_t) = \sigma^2$  pois  $Cov(Z_t, Z_t) = Var(Z_t)$ .

A equação (3.9) pode ser descrita como a covariância de  $Z$  em relação a seus valores anteriores, daí vem o termo autocovariância (HAMILTON, 1994).

### 3.2.3 Autocorrelação

A autocorrelação é a autocovariância padronizada pela variância e é utilizada para medição do comprimento e a memória de um processo, ou seja, a extensão para qual o valor tomado no instante  $t$  depende de um valor tomado no instante  $t-k$ . A autocorrelação de defasagem  $k$  é dada por:

$$\rho_k = \frac{Cov(Z_t, Z_{t+k})}{Var(Z_t)} = \frac{\gamma_k}{\sigma^2} \text{ para } k=0,1,2,\dots \quad (3.10)$$

### 3.2.4 Estacionaridade

Um processo é chamado fracamente estacionário ou estacionário de segunda ordem se a média  $\mu_t$  e a autocovariância  $\gamma_k$  satisfazem:

$$E(Z_t) = \mu_t = \mu \quad \text{para todo } t.$$

$$E(Z_t - \mu)(Z_{t+k} - \mu) = \gamma_k \text{ para todo } t.$$

Um processo é chamado estritamente estacionário se, para quaisquer valores de  $k_1, k_2, \dots, k_n$ , a soma das distribuições de  $(Z_t, Z_{t+k_1}, Z_{t+k_2}, \dots, Z_{t+k_n})$  depende somente dos intervalos que separam os tempos  $(k_1, k_2, \dots, k_n)$  e não do tempo propriamente dito ( $t$ ). Isto significa que todas as distribuições unidimensionais são invariantes sob translações do tempo, logo:

$$E(Z_t) = \mu \quad \text{para todo } t.$$

$$\text{Var}(Z_t) = \sigma^2 \quad \text{para todo } t.$$

Como a grande maioria dos processos são fracamente estacionários, a partir de agora chamaremos estes processos de simplesmente *processos estacionários*. Alguns processos estacionários podem ser diferenciados para a obtenção de processos estritamente estacionários (HAMILTON, 1994).

### 3.2.5 Ruído Branco

Dizemos que um sinal  $\{a_t, t \in Z\}$  é ruído branco discreto se as variáveis aleatórias  $a_t$  são não-correlacionadas, isto é,  $\text{Cov}\{a_t, a_s\} = 0$  para  $t \neq s$ .

Uma seqüência de variáveis aleatórias independentes e não-correlacionadas que possui as seguintes características:

$$E(a) = 0$$

$$E(a^2) = \sigma^2$$

$a_t \sim N(0, \sigma^2)$  é chamado de *ruído branco gaussiano* (MORETTIN; TOLOI, 2006).

## 3.3 TIPOS DE MODELOS

A criação de modelos para séries temporais depende de diversos fatores, tais como o comportamento do fenômeno ou o conhecimento *a priori* que tem-se de sua natureza e do objetivo da análise. Na prática, depende também da existência de métodos apropriados de estimação e da disponibilização de *softwares* adequados (MORETTIN; TOLOI, 2006).

Pode-se classificar os modelos para séries temporais em duas classes: modelos paramétricos (número finito de parâmetros); modelos não-paramétricos (número infinito de parâmetros).

Na classe de modelos paramétricos, a análise é feita no domínio do tempo. Dentre estes, os mais usados são os modelos de erro (ou de regressão), os modelos auto-regressivos e de médias móveis (ARMA), os modelos auto-regressivos integrados e de médias móveis (ARIMA), modelos de memória longa, modelos estruturais e modelos não-lineares.

Os modelos não-paramétricos mais utilizados são a função de autocovariância (ou autocorrelação) e sua transformada de Fourier, ou espectro de frequência. É importante ressaltar que mesmo trabalhando-se com modelos paramétricos, a análise do espectro de frequência desempenha importante papel nos estudos de resposta em frequências e na área de otimização de desempenho de processos industriais, especialmente em modelos ARMA e ARIMA.

### 3.3.1 Definição de Modelos ARIMA

Os modelos ARIMA descrevem, de maneira adequada, as seguintes classes de processos (MORETTIN; TOLOI, 2006):

(i) Processos lineares estacionários, assim representados:

$$Z_t - \mu = a_t + \varphi_1 a_{t-1} + \varphi_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \varphi_k a_{t-k}, \quad \varphi_0 = 1 \quad (3.11)$$

Onde  $a_t$  é o ruído branco,  $\mu = E(Z_t)$  e  $\varphi_1, \varphi_2, \dots$  é uma seqüência de parâmetros tal que:

$$\sum_{k=0}^{\infty} \varphi_k^2 < \infty \quad (3.12)$$

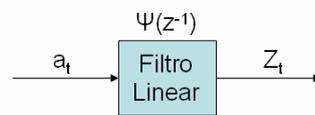
(ii) Processos lineares não-estacionários homogêneos. São processos que possuem erros correlacionados e que as séries apresentam não-estacionaridade de nível ou inclinação (comportamento de um ação na bolsa de valores, por exemplo). Podem ser transformados no caso (i) por meio de diferenciação.

(iii) Processos de memória longa. Processos estacionários que possuem decaimento da autocorrelação muito lento.

Existem três casos particulares do modelo (3.11) que serão utilizados adiante:

1. Processo auto-regressivo de ordem p: AR(p);
2. Processo médias móveis de ordem q: MA(q);
3. Processo auto-regressivo e de médias móveis de ordens p e q: ARMA(p,q).

Os modelos analisados neste trabalho baseiam-se no estudo de modelos de filtro linear. Este modelo supõe que a série temporal é gerada por um sistema linear onde temos um ruído branco como entrada como pode ser visualizado na Figura 09:



Fonte: MORETTIN; TOLOI, 2006.

Figura 09 – Filtro linear, com entrada  $a_t$ , saída  $Z_t$  e função de transferência

$$\psi(z^{-1}).$$

Deste modelo temos que:

$$Z_t = \mu + a_t + \phi_1 a_{t-1} + \phi_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_k a_{t-k}, -\phi_0 = 1 \text{ ou}$$

$$\tilde{Z}_t = (Z_t - \mu) = a_t + \phi_1 a_{t-1} + \phi_2 a_{t-2} + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \phi_k a_{t-k}, -\phi_0 = 1$$

Onde  $\psi(z^{-1})$  é denominada função de transferência do processo.

A modelagem proposta por (BOX *et al*, 1994) é da forma da equação abaixo, onde o filtro linear  $\psi(z^{-1})$  é definido por:

$$\psi(z^{-1}) = \frac{\theta_q(z^{-1})}{\phi_p(z^{-1})}$$

Desta forma os modelos Box&Jenkins são dados por:

$$\phi_p(z^{-1})Z_t = \theta_q(z^{-1})a_t \quad (3.13)$$

onde:

- i)  $\phi(\cdot)$  e  $\theta(\cdot)$  são polinômios do tipo  $P(z^{-1}) = 1 - C_1 z^{-1} - C_2 z^{-2} - \dots - C_k z^{-k}$  de graus p e q, respectivamente.

ii)  $z^{-1}$  é o operador atraso e seu efeito sobre a variável discreta é:

$$z^{-k}Z_t = Z_{t-k}$$

De acordo com (BOX *et al*, 1994), o modelo (3.13) é denominado ARMA(p,q) (SOUZA; CAMARGO, 2004). Deste modelo podemos extrair dois casos particulares: modelos autoregressivos (do inglês AR- *Autoregressive*) e modelos médias móveis (do inglês MA-*Moving Average*).

### 3.3.2 Modelos Autoregressivos (AR)

Os modelos cujos polinômios  $\theta$  são iguais a 1 são chamados modelos autoregressivos. Sendo assim, temos a seguinte equação para estes modelos:

$$\tilde{Z}_t = \phi_1 \tilde{Z}_{t-1} + \phi_2 \tilde{Z}_{t-2} + \dots + \phi_p \tilde{Z}_{t-p} + a_t \text{ ou}$$

$$(1 - \phi_1 z^{-1} + \phi_2 z^{-2} + \dots + \phi_p z^{-p}) \tilde{Z}_t = a_t \text{ ou}$$

$$\phi(z^{-p}) \tilde{Z}_t = a_t \tag{314}$$

onde,  $\tilde{Z}_t = Z_t - \mu$ .

Estes modelos são chamados “auto-regressivos” devido ao fato de que  $Z_t$  no instante  $t$  é função dos  $Z$ 's nos instantes anteriores à  $t$ .

### 3.3.3 Modelos Médias Móveis (MA)

Os modelos cujos polinômios  $\theta$  são iguais a 1 são chamados modelos médias móveis. Sendo assim, temos a seguinte equação para estes modelos:

$$\tilde{Z}_t = a_t + \theta_1 a_{t-1} + \theta_2 a_{t-2} + \dots + \theta_q a_{t-q} \text{ ou}$$

$$\tilde{Z}_t = (1 - \theta_1 z^{-1} + \theta_2 z^{-2} + \dots + \theta_q z^{-q}) a_t \text{ ou}$$

$$\tilde{Z}_t = \theta(z^{-q}) a_t \tag{3.15}$$

Estes modelos são chamados “médias móveis” devido ao fato de que  $Z_t$  é uma função soma algébrica ponderada dos  $a_t$ 's que se movem no tempo de forma

similar a uma média móvel. Contudo, isto não é verdade pois nem sempre sua soma totaliza uma unidade.

### 3.3.4 Modelos Integrados (I)

Conforme citado anteriormente, para algumas séries não-estacionárias homogêneas é possível a representação por modelos ARMA desde que seja realizada a diferenciação dos valores de  $Z_t$  previamente. Para estes casos, sendo  $Z_t$  não-estacionária, tomarmos a diferenciação:

$$W_t = Z_t - Z_{t-1} = (1 - z^{-1})^d Z_t = \Delta Z_t \quad (3.11)$$

Com isto, esta série diferenciada apresenta comportamento estacionário. A quantidade de vezes que é necessário se diferenciar uma série para torná-la estacionária é chamada de ordem do modelo integrado (d).

### 3.3.5 Modelos Auto-regressivos, Integrados e de Médias Móveis (ARIMA)

Os modelos cujos polinômios  $\phi$  e  $\theta$  são diferentes de 1 e onde são utilizadas diferenciações para impor estacionaridade são chamados modelos auto-regressivos integrados e de médias móveis. Estes modelos são assim representados:

$$(1 - \phi_1 z^{-1} + \phi_2 z^{-2} + \dots + \phi_p z^{-p})(1 - z^{-1})^d \tilde{Z}_t = (1 - \theta_1 z^{-1} + \theta_2 z^{-2} + \dots + \theta_q z^{-q}) a_t \quad \text{OU}$$

$$\phi(z^{-p}) \Delta^d \tilde{Z}_t = \theta(z^{-q}) a_t \quad (3.16)$$

Usualmente, estes modelos são representados com a notação ARIMA(p,d,q).

### 3.3.6 Modelos Auto-regressivos, Integrados e de Médias Móveis com Entrada Exógena (ARIMAX)

Os modelos cujos polinômios  $\phi$  e  $\theta$  são diferentes de 1, onde são utilizadas diferenciações e onde temos entradas exógenas (externas) são chamados modelos auto-regressivos, integrados, de médias móveis com entrada exógena. Estes modelos são assim representados:

$$(1 - \phi_1 z^{-1} + \phi_2 z^{-2} + \dots + \phi_p z^{-p})(1 - z^{-1})^d \tilde{Z}_t = (1 - b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_q z^{-q})u_t + \dots \\ \dots + (1 - \theta_1 z^{-1} + \theta_2 z^{-2} + \dots + \theta_q z^{-q})a_t$$

ou

$$\phi(z^{-1})\Delta^d \tilde{Z}_t = B(z^{-1})u_t + \theta(z^{-1})a_t \quad (3.17)$$

Usualmente, estes modelos são utilizados em representações de sistemas com altas correlações entre entrada-saída, no seu modelo simplificado, também conhecido como função de transferência:

$$\frac{\tilde{Z}_t}{u_t} = \frac{B(z^{-1})}{\phi(z^{-1})}$$

### 3.4 IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS ARIMA

Uma metodologia bastante utilizada na análise de modelos paramétricos é conhecida como abordagem de Box e Jenkins que foi criada em 1970 e otimizada em 1994 (BOX *et al*, 1994). Esta consiste no ajuste de modelos autorregressivos integrados e de médias móveis, ARIMA(p,d,q), a um conjunto de dados (SOUZA; CAMARGO, 2004).

A estratégia de construção do modelo é baseada no ciclo iterativo abaixo:

- (a) Uma classe de modelos é especificada para a análise;
- (b) Há uma identificação do modelo com base na análise de autocorrelações, autocorrelações parciais e outros critérios;
- (c) Os parâmetros dos modelos são estimados, usualmente por meio de mínimos quadrados;
- (d) Há a verificação ou validação do modelo encontrado, através da análise dos resíduos, para se saber se é adequado ao objetivo desejado (previsão, por exemplo).

Em caso de problemas em quaisquer umas das fases acima, todo o ciclo é repetido. A etapa crítica do processo é a identificação. Esta se divide em três partes:

- (i) Checar a necessidade de uma transformação na série original, com o objetivo de se estabilizar sua variância (séries estacionárias). Isto pode ser feito através de análise gráfica;
- (ii) Diferenciar a série quantas vezes forem necessárias até que a série se torne estacionária de modo que o processo  $\Delta^d Z_t$  seja reduzido a um ARMA(p,q);
- (iii) Identificar o processo ARMA(p,q) resultante, através da análise das autocorrelações e autocorrelações parciais do processo em análise comparando-as com os respectivos comportamentos dos modelos AR, MA e ARMA teóricos (MORETTIN; TOLOI, 2006).

### 3.4.1 Teste de Estacionariedade

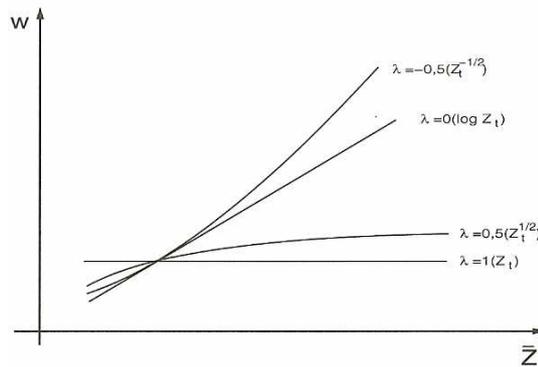
Para se identificar se há necessidade de realização de transformação da série analisada, devemos montar um gráfico que traz no eixo das abscissas as médias dos subconjuntos de observações da série original e no eixo das ordenadas a amplitude de cada um desses subconjuntos.

Tomando-se  $Z_1, \dots, Z_k$  como sendo um subconjunto com k observações, calculamos

$$\bar{z} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k Z_{ii} \text{ (eixo das abscissas)}$$

$$w = \max(Z_{ii}) - \min(Z_{ii}) \text{ (eixo das ordenadas)}$$

Estas duas variáveis  $\bar{z}$  e  $w$  são medidas de posição e variabilidade, respectivamente. O número de elementos dos subconjuntos deve ser escolhido de modo a conter alguns ciclos do sinal original. Na Figura 10 temos alguns exemplos de gráficos possíveis (MORETTIN; TOLOI, 2006).



Fonte: MORETTIN; TOLOI, 2006.

Figura 10 – Gráfico amplitude x média.

Caso  $w$  não apresente independência de  $\bar{Z}$  (reta paralela ao eixo das abscissas), haverá necessidade de transformação. Esta série deverá ser diferenciada e o gráfico remontado acima até que a independência temporal seja alcançada. Esta independência traduz-se como estabilização da variância do processo (SOUZA; CAMARGO, 2004).

### 3.4.2 Função de Autocorrelação

A identificação de séries temporais se dá, como já mencionado anteriormente, através da comparação do gráfico correlograma (autocorrelações x lags) da série em análise com os correlogramas dos modelos teóricos AR, MA e ARMA. Para os modelos AR(p), a função de autocorrelação (a partir de agora chamada ACF do inglês *autocorrelation function*) decai exponencialmente ou como senóides amortecidas alternando-se entre valores positivos e negativos ou não dependendo dos valores dos parâmetros  $\phi$ . Estes comportamentos podem ser visualizados na Figura 11.

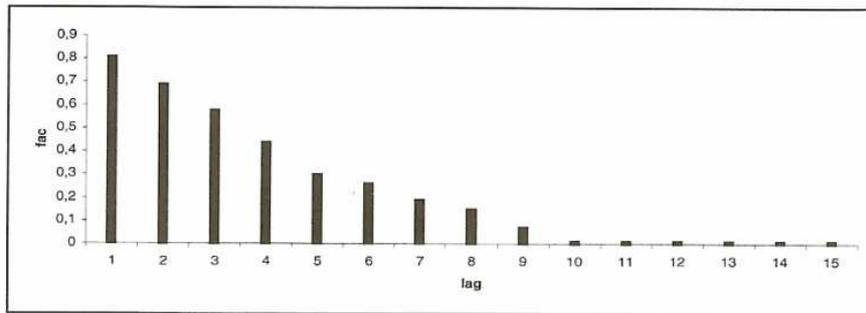
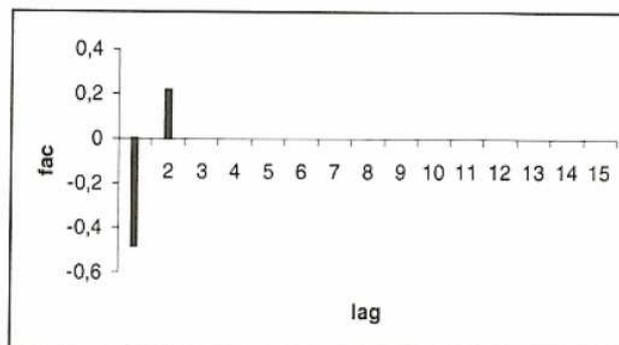


Figura 11 –ACF de processos AR(1).

Fonte: MORETTIN; TOLOI, 2006.

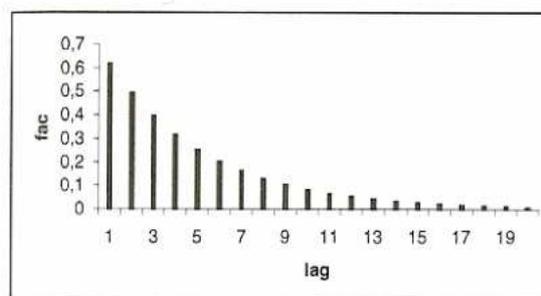
Para os modelos MA(q), a função de autocorrelação é igual a zero para *lags* maiores que q, ao contrário do que acontece em processos AR. Estes comportamentos podem ser visualizados na Figura 12.



Fonte: MORETTIN; TOLOI, 2006.

Figura 12 –ACF de processos MA(2).

Para os modelos ARMA(p,q), a função de decai exponencialmente ou como senóides amortecidas após o *lag* q-p, similarmente ao modelo AR. Estes comportamentos podem ser visualizados na Figura 13.



Fonte: MORETTIN; TOLOI, 2006.

Figura 13 –ACF de processos ARMA(1,1).

Para se realizar a diferenciação entre modelos AR e ARMA precisaremos incrementar a identificação através de autocorrelações parciais.

### 3.4.3 Função de Autocorrelação Parcial

Para melhorar o processo de identificação de modelos ARMA, a função de autocorrelação parcial (a partir de agora chamada de PACF do inglês *partial autocorrelation function*) foi proposta por (BOX *et al*, 1994). Esta função mede a dependência linear entre  $Z_t$  e  $Z_{t+k}$ , eliminando-se o efeito das variáveis intermediárias  $Z_{t+1}, Z_{t+2}, \dots, Z_{t+k-1}$ .

Seja  $\phi_{kj}$  o  $j$ -ésimo coeficiente de um modelo AR(k) de modo que  $\phi_{kk}$  seja o último coeficiente e  $\rho_j$  a autocorrelação de ordem  $j$ .

Sabemos que,

$$\rho_j = \phi_{k1}\rho_{j-1} + \phi_{k2}\rho_{j-2} + \dots + \phi_{kk}\rho_{j-k} \quad \text{para } j=1,2,\dots,k.$$

De onde obtemos as equações de Yule-Walker

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho_1 & \rho_2 & \dots & \rho_{k-1} \\ \rho_1 & 1 & \rho_1 & \dots & \rho_{k-2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \rho_{k-1} & \rho_{k-2} & \rho_{k-3} & \dots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_{k1} \\ \phi_{k2} \\ \dots \\ \phi_{kk} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_1 \\ \rho_2 \\ \dots \\ \rho_k \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Resolvendo estas equações sucessivamente para  $k=1,2,\dots$  obtemos os termos  $\phi_{kk}$ .

Em geral temos que,

$$\phi_{kk} = \frac{|P_k^*|}{|P_k|}$$

onde  $P_k$  é a matriz das autocorrelações e  $P_k^*$  é a matriz  $P_k$  com a última coluna substituída pelo vetor das autocorrelações. O índice  $\phi_{kk}$  é chamado função de autocorrelação parcial.

Foi demonstrado por (BOX *et al*, 1994) que a PACF apresenta os seguintes comportamentos para os modelos estudados:

- (i) um processo AR(p) tem PACF  $\phi_{kk} \neq 0$  para  $k \leq p$  e  $\phi_{kk} = 0$  para  $k > p$ ;

- (ii) um processo MA(q) tem PACF similar à ACF de um modelo AR(p), ou seja, decai exponencialmente ou como senóides amortecidas;
- (iii) um processo ARMA(p,q) tem PACF similar a uma PACF de um processo MA(q) puro.

Existem duas maneiras de se estimar os parâmetros  $\phi_{kk}$ , (1) estimar sucessivamente modelos autoregressivos de ordens  $p=1,2,3\dots$  por mínimos quadrados (será visto adiante) e tomando as estimativas dos últimos coeficientes de cada ordem ou (2) substituir nas equações de Yule-Walker as facs de  $\rho_j$  por suas estimativas amostrais.

A Tabela 02 apresenta um resumo contendo as principais características dos modelos AR, MA e ARMA:

Tabela 02 – Principais características das ACF e PACF de modelos AR, MA e ARMA.

Fonte: (BARROS, 2004).

	AR(p)	MA(q)	ARMA(p,q)
Estrutura do modelo	$\phi(B)Z_t = a_t$	$Z_t = \theta(B)a_t$	$\phi(B)Z_t = \theta(B)a_t$
Função de Autocorrelação ( $\rho_k$ )	Infinita (Exponenciais e ou senóides amortecidas)	Finita (redução abrupta após o lag q)	Infinita (Exponenciais e ou senóides amortecidas após “q-p”)
Função de Autocorrelação Parcial( $\phi_{kk}$ )	Finita (redução abrupta após o lag p)	Infinita (Exponenciais e ou senóides amortecidas)	Infinita (Exponenciais e ou senóides amortecidas)

#### 3.4.4 Estimação dos Parâmetros

Após identificação do modelo para a série temporal, com base nas ACF e PACF, a próxima etapa consiste na estimação dos parâmetros deste modelo. Notemos que num modelo ARMA(p,q) existem  $p+q+1$  parâmetros a serem identificados (os  $\phi_i$ 's, os  $\theta_i$ 's e a variância do erro,  $\sigma_a^2$ ).

Na estimação de parâmetros, um dos métodos bastante utilizado é o da máxima verossimilhança que define que: Dadas  $N$  observações  $Z_1, Z_2, \dots, Z_N$ , consideramos a função de verossimilhança  $L(\xi|Z_1, Z_2, \dots, Z_N)$  vista como função de  $\xi$  ( $\xi = (\phi, \theta, \sigma_a^2)$ ). Os estimadores de máxima verossimilhança (EMV) de  $\xi$  serão os valores que maximizam  $L$  ou  $l = \log L$ . Com a suposição que o processo  $a_t$  é normal, ou seja, para cada  $t$ ,  $a_t \sim N(0, \sigma_a^2)$ , os EMV se aproximam bastante de estimadores de mínimos quadrados (EMQ) (MORRETIN; TOLOI, 2006; BARROS, 2004; SOUZA; CAMARGO, 2004).

Ainda de acordo com (MORRETIN; TOLOI, 2006; BARROS, 2004; SOUZA; CAMARGO, 2004; WEI, 2006), o método dos mínimos quadrados é uma técnica de otimização matemática que procura encontrar o melhor ajuste para um conjunto de dados tentando minimizar a soma dos quadrados das diferenças entre a curva ajustada e os dados (tais diferenças são chamados resíduos).

Um requisito implícito para o método dos mínimos quadrados trabalharem é que os erros em cada medida sejam distribuídos aleatoriamente com função densidade de probabilidade gaussiana, e que os resíduos sejam independentes. Analisando com foco em séries temporais, temos um vetor  $Z_t$  e a função  $\xi$  que queremos estimar. O EMQ consiste então em encontrar os parâmetros de  $\xi$  que minimizam a soma dos quadrados dos resíduos, ou seja:

$$S = \sum_{t=1}^N (Z_t - \xi_t)^2 \quad (3.19)$$

### 3.4.5 Transformada Discreta de Fourier

A transformada discreta no tempo de Fourier de uma sequência  $x(n)$  é definida como,

$$X(e^{j\omega}) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} x(n)e^{-j\omega n} \quad (3.20)$$

Devido à periodicidade de  $2\pi$  da exponencial complexa,  $X(e^{j\omega})$  é periódico. Se  $x(n)$  é obtido através da amostragem regular de um sinal  $x_c(t)$  contínuo no tempo, então  $x(n)=x_c(nT)$ , onde  $T$  é o período de amostragem.

Para o caso de sinais periódicos, temos :

$$X(k) = \sum_{n=0}^{N-1} x(n)W_N^{nk} \quad (3.21)$$

Onde

$$W_N = e^{-j2\pi/N}$$

A equação (3.21) é conhecida como transformada discreta de Fourier ou DFT (do inglês *Discrete Fourier Transformation*). Desta equação temos:

$$x = \begin{bmatrix} x(0) \\ x(1) \\ \dots \\ x(N-1) \end{bmatrix}, \quad X = \begin{bmatrix} X(0) \\ X(1) \\ \dots \\ X(N-1) \end{bmatrix} \quad e \quad W = [W_N^{kn}] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ 1 & W_N & \dots & W_N^{N-1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & W_N^{N-1} & \dots & W_N^{(N-1)(N-1)} \end{bmatrix}$$

Onde estas relações podem ser expressas como:

$$X = Wx \quad e \quad x = \frac{1}{N}W^H X \quad (3.22)$$

Para uma entrada  $x(n)$  complexa de tamanho  $N$ , a implementação da DTF da matriz  $W$  demanda  $N^2$  multiplicações complexas. A idéia por traz da transformada rápida de Fourier (FFT – do inglês – *Fast Fourier Transformation*) é a fatoração de  $W$  em produtos de matrizes menores que juntas requerem uma menor complexidade de implantação se comparada com a DFT.

No caso de interesse na densidade espectral de potência (transformada de Fourier da sequência de autocorrelações), pode-se utilizar a FFT para executar este algoritmo, também conhecido como Periodograma.

$$P_{xx}(e^{j\omega_k}) = \frac{1}{N} \left| \sum_{n=0}^{N-1} x(n)e^{-j2\pi n/N} \right|^2 \quad (3.23)$$

O resultado pode ser entendido como a quantidade de energia do sinal contida em cada frequência analisada e é utilizada para obtenção da densidade

espectral de potência, também conhecida como periodograma . Esta ferramenta é importante na identificação de séries temporais através da resposta em frequência (MERTINS,1999).

### 3.5 IDENTIFICAÇÃO DE MODELOS COM ENTRADA EXÓGENA

A identificação de modelos ARMAX (do *inglês autoregressive moving average with exogenous input*) se propõe a obter um modelo matemático que explique, pelo menos em parte e de forma aproximada, a relação causa e efeito presente nos dados.

A primeira etapa corresponde ao estudo do processo visando identificar as possíveis entradas do sistema. Após isto, calculamos as correlações entre as entradas e a saída. Caso estas correlações sejam relevantes, identificam-se os parâmetros pelo método dos mínimos quadrados conforme procedimento abaixo (AGUIRRE, 2007).

Considere a seguir um modelo matemático dado pela equação a diferenças com erro na saída:

$$y(t) = a_1 y(t-1) + \dots + a_{nf} y(t-nf) + b_1 u(t-k) + \dots + b_{nb} u(t-nb-k+1) + e(t) \quad (3.24)$$

onde  $k$  é o número de atrasos;  $e(t)$  é o erro da modelagem,  $nf$  é o número de saídas passadas e  $nb$  é o número de entradas passadas, sendo  $k$ ,  $nf$  e  $nb$ , números inteiros positivos.  $a_i$  ( $i=1, nf$ ) e  $b_j$  ( $j=1, nb$ ) são os parâmetros do modelo. Dessa forma, o problema é determinar os parâmetros dessa equação dinâmica a partir de medidas de entrada e de saída, usando o método dos mínimos quadrados. Em seguida, determina-se a função de transferência contínua a partir dessa equação a diferenças. O problema de determinação dos parâmetros pelo método matemático proposto pode ser formulado como segue.

Define-se o vetor de medidas por

$$\varphi^T(t) = [Z(t-1) \ Z(t-2) \dots Z(t-nf) \ u(t-k) \dots u(t-k-nb+1)]$$

e o vetor de parâmetros

$$\theta = [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{nf} \ b_1 \ b_2 \ \dots \ b_{nb}]^T$$

A equação (3.24) fica

$$Z(t) = \varphi^T(t)\theta + e(t) \quad (3.25)$$

Admitindo que sejam realizadas  $N \geq nf + nb$  medidas para determinar os parâmetros da equação (3.25), temos a seguinte equação matricial:

$$Z = \Phi\theta + E$$

em que:

$$Z = \begin{bmatrix} Z(t) \\ \vdots \\ Z(t+N-1) \end{bmatrix}$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} \varphi^T(t) \\ \vdots \\ \varphi^T(t+N-1) \end{bmatrix}$$

$$E = [e(t) \ e(t+1) \dots e(t+N-1)]^T$$

O método dos mínimos quadrados possibilita estimar o vetor de parâmetros  $\theta$  de maneira que o erro quadrático ( $E^2$ ) seja minimizado, conforme a função objetivo abaixo:

$$\min_{\hat{\theta}} \sum_i^N E^T E \quad (3.26)$$

onde  $E = Z - \Phi\hat{\theta}$  e  $E^T = \hat{Z}^T \Phi^T \hat{\theta}$

Se a matriz é inversível, a solução de (3.26) é única e dada de forma analítica por:

$$\hat{\theta} = [\Phi^T \Phi]^{-1} \Phi^T Y \quad (3.27)$$

Considerações importantes:

- 1) A dimensão de  $[\Phi^T \Phi]^{-1}$  depende do número de parâmetros desconhecidos do vetor  $\theta$ . Para  $m$  parâmetros desconhecidos, a matriz tem dimensão  $m$  por  $m$ .
- 2) Para que a matriz  $\Phi^T \Phi$  seja inversível, a entrada  $u$  precisa variar suficientemente para garantir que o determinante de  $\Phi^T \Phi$  seja diferente de zero. Ou seja, precisa garantir a não singularidade dessa matriz.

### 3.6 PREVISÃO DE MODELOS ARIMA

O preditor  $k$  passos à frente que minimize a variância do erro de previsão, definido por  $\hat{Z}_{t+k}$ , é obtido através da seguinte expressão (SODERSTROM, 1994):

$$\min_{\hat{Z}} E \left[ (Z_{t+k} - \hat{Z}_{t+k})^2 \right] = E[Z_{t+k} | Z_t, Z_{t-1}, \dots, Z_0]$$

Portanto, devemos obter:

$$\hat{Z}_{t+k} = E(Z_{t+k} | Z_t) \quad (3.28)$$

Avaliando o modelo ARMA (3.13) no instante  $t+k$  tem-se que:

$$Z_{t+k} = \lambda \frac{\theta(z^{-1})}{\phi(z^{-1})} a_{t+k} \quad (3.29)$$

Onde  $\lambda$  é uma constante de sintonia do modelo.

Definindo-se os polinômios  $F$  e  $G$ , como sendo

$$\frac{\theta(z^{-1})}{\phi(z^{-1})} = F(z^{-1}) + z^{-k} \frac{G(z^{-1})}{\phi(z^{-1})} \quad (3.30)$$

Onde

$$F(z^{-1}) = 1 + f_1 z^{-1} + f_2 z^{-2} + \dots + f_{k-1} z^{-k+1}$$

$$G(z^{-1}) = g_0 + g_1 z^{-1} + g_2 z^{-2} + \dots + g_{N-1} z^{-p+1}$$

De (3.29) e (3.30), temos:

$$Z_{t+k} = \lambda F a_{t+k} + \frac{G}{\phi} a_t = \lambda F a_{t+k} + \lambda \frac{G}{\phi} \frac{1}{\lambda} \frac{\phi}{\theta} Z_t$$

Portanto, temos a equação abaixo denominada equação Diophantina

$$Z_{t+k} = \lambda F a_{t+k} + \frac{G}{\theta} Z_t \quad (3.31)$$

Como  $F$  é um polinômio de ordem  $k-1$ , o termo  $\lambda F a_{t+k}$  será composto pela soma de ruídos brancos a partir do instante  $t+1$ . Logo, aplicando o valor esperado condicional (3.31) em (3.29), chegamos a seguinte equação de previsão:

$$\hat{Z}_{t+k} = \frac{G(z^{-1})}{\theta(z^{-1})} Z_t \quad (3.32)$$

O erro de previsão para este caso é dado por

$$e_{t+k} = Z_{t+k} - \hat{Z}_{t+k} = \lambda F(z^{-1}) a_{t+k} \quad (3.33)$$

A variância do erro de previsão é dada por

$$\text{var } e_{t+k} = \lambda^2 \{1 + f_1^2 + \dots + f_{k-1}^2\} \quad (3.34)$$

Nota-se que a variância cresce à medida que o horizonte de previsão aumenta.

### 3.7 VALIDAÇÃO DO MODELO ARIMA

Nesta etapa, verificamos se o modelo obtido descreve adequadamente os dados do processo. Devemos nos lembrar que, ao ajustarmos um modelo ARIMA, buscamos capturar toda, ou grande parte, da estrutura de dependência serial presente na série. Sendo assim, os resíduos dos modelos (diferenças entre os dados originais e os dados estimados ( $r_t = Z_t - \tilde{Z}_t$ )) não devem conter qualquer tipo de dependência temporal, pois se ainda existe dependência nos resíduos é sinal que esta dependência deveria ter sido capturada e incorporada no modelo. Logo, num modelo ARIMA bem ajustado, os erros de previsão a um passo a frente (resíduos) devem ser uma seqüência de ruídos brancos, ou seja, não devem apresentar autocorrelações, ou autocorrelações parciais significativas (BARROS, 2004).

Na busca por um bom modelo devemos buscar os seguintes aspectos:

- i) Produzir previsões suficientemente próximas da realidade;
- ii) Ter resíduos independentes com média zero e variância constante, ou seja, as autocorrelações dos resíduos não devem revelar dependências seriais significativas;
- iii) Ser parcimonioso, isto é, apresentar um número relativamente pequeno de parâmetros.

### 3.7.1 Erro Médio Quadrático da Previsão

Como o principal objetivo, neste caso, é a identificação de um modelo ARIMA para a realização de previsão, utilizaremos o critério que quanto menor for o erro médio quadrático, melhor será o modelo encontrado.

O erro médio quadrático de previsão (EMQP) é dado por:

$$EMQP = \frac{1}{N} \sqrt{\sum_{t=1}^N e(k)^2} \quad (3.35)$$

onde  $e(t) = Z(t+k) - \hat{Z}(t+k|t)$  é a diferença entre os valores reais da série e seus valores estimados  $k$  passos à frente (previstos) em cada instante de tempo  $t$ .

### 3.7.2 Testes com Base na Análise Residual

O princípio deste teste é que, conforme citado anteriormente, um bom modelo não deve apresentar qualquer dependência, ou seja, média dos resíduos nula, variância constante e sua autocorrelação não deve ter *lags* significativos.

### 3.7.3 Testes de Sobrefixação

O objetivo deste teste é o ajuste de um modelo ARMA de ordem maior que a ordem encontrada, através da elevação dos graus dos polinômios AR e MA, e analisar se houve ganhos significativos com esta alteração. Por exemplo, se o modelo identificado é um AR(1) pode-se testar um AR(2) e um ARMA(1,1) e verificar se a inclusão de novos parâmetros resultou em ganhos para o processo.

### 3.7.4 Teste de Hipótese

No teste de hipótese verifica-se se os dados são compatíveis com certa hipótese, podendo sugerir ou não a validade da mesma. Os testes de hipóteses são sempre constituídos por duas hipóteses, a hipótese nula  $H_0$  e a hipótese alternativa  $H_1$ . A hipótese nula ( $H_0$ ) é a hipótese que traduz a ausência do efeito que se quer verificar e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) que é a hipótese que o investigador quer verificar. Deve-se definir também, o nível de significância do teste,  $\alpha$ , que é a probabilidade de se rejeitar a hipótese nula quando ela é efetivamente verdadeira. Na figura 14 temos um exemplo de teste de hipótese (LEVINE,2005).

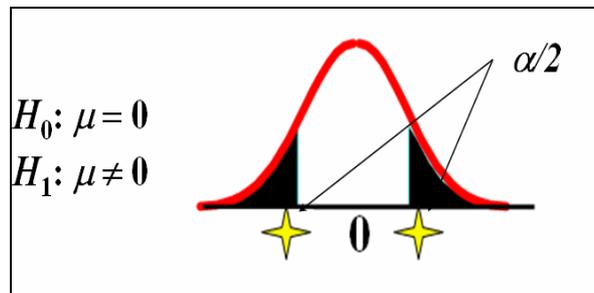


Figura 14 –Exemplo de Teste de Hipóteses.

O teste de hipóteses é realizado com base na seguinte equação:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma / \sqrt{n}} \quad (3.36)$$

Onde  $\bar{X}$  é a média obtida com a retirada do parâmetro analisado (hipótese  $H_0$ ),  $\mu$  é a média da amostra original,  $\sigma$  é o desvio padrão da amostra e  $n$  é o tamanho da amostra.

Este teste será usado no desenvolvimento do trabalho para a análise de significância dos parâmetros do modelo ARMA escolhido.



**RESULTADOS E  
DISCUSSÃO**



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de uma ferramenta que auxilie na tomada de decisão sobre o instante de abertura do furo-de-gusa e seu tamponamento pode contribuir para tornar esta operação mais confiável e assertiva, trazendo, conseqüentemente, uma otimização do processo.

O procedimento apresentado a seguir constitui a junção de vários modelos e metodologias descritos nas literaturas de referência, incluindo adaptações para melhor representar o processo do alto-forno. Esses modelos retratam as principais dinâmicas do nível dos líquidos no interior do cadinho do alto-forno, podendo ser utilizados na rotina diária de operação (medição e predição) além da utilização como entrada em sistemas especialistas visando à otimização ou sintonia dos processos operacionais. Como estudo de caso, utilizaremos o Alto-Forno nº3 da ArcelorMittal Tubarão (antiga Companhia Siderúrgica de Tubarão - CST), localizada na região da Grande Vitória, Espírito Santo.

O Alto-Forno nº3 da ArcelorMittal Tubarão possui 04 furos-de-gusa dispostos de maneira simétrica, volume interno de  $3617\text{m}^3$ , 34 ventaneiras, cadinho com 12,5 metros de diâmetro com  $550\text{m}^3$  de volume de trabalho, apresentando uma produção diária média de gusa de 7800t/dia e de escória de 2000t/dia. Na Figura 15 é apresentada uma visão geral da planta.



Figura 15 – Visão panorâmica do Alto-Forno 3 da ArcelorMittal Tubarão.

Fonte: ArcelorMittal Tubarão.

O trabalho de elaboração da ferramenta preditiva para monitoração do nível dos líquidos no interior de cadinho de altos fornos foi desenvolvido através seguintes etapas: Instalação dos equipamentos, modelagem da FEM por modelo ARMAX, filtragem do sinal de nível dos líquidos, modelagem do nível por séries temporais, validação do modelo encontrado e predição do nível dos líquidos.

## 4.2 INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS

Com base nas informações obtidas através dos artigos técnicos sobre o assunto, foram instalados 04 conjuntos de sensores na carcaça do alto-forno, um conjunto por furo-de-gusa. Estes sensores medem a diferença entre as forças eletromotrizes geradas na carcaça das regiões inferiores (fundo do cadinho) e superiores (acima dos níveis das ventaneiras), conforme pode ser visualizado na Figura 16.

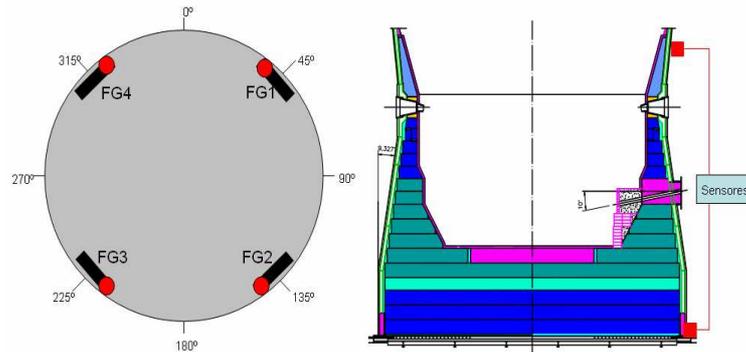


Figura 16 – Disposição física dos sensores nos furos-de-gusa do Alto-Forno 3 (vista superior e perfil).

Cada um destes conjuntos sensores é composto por parafusos de aço carbono (M16, 100mm de comprimento com furo axial para conexão, 2 arruelas e 2 porcas) soldados na carcaça do alto-forno e espaçados verticalmente de 10 metros entre si. Para conexão elétrica, foram utilizados cabos de aço carbono (2mm<sup>2</sup>, proteção plástica), usualmente utilizados como acionamentos mecânicos de chaves de emergência de correias transportadoras, ao invés de cabos elétricos afim de se evitar o efeito Seeback no circuito, onde diferenças de temperatura entre os terminais de materiais diferentes geram correntes elétricas (Peters *et al*, 2001), como pode ser visualizado na Figura 17. Na região das ventaneiras, onde há contato dos cabos com a carcaça do alto-forno sem refrigeração, foram utilizadas mantas de isolamento térmico para proteção.



Figura 17 – Detalhe de instalação dos sensores nos furos-de-gusa do alto-forno.

Encontra-se instalado neste alto-forno, o sistema digital de controle distribuído (SDCD) CS3000 de fabricação da Yokogawa para integração e operação de todas as áreas e processos da planta, conforme detalhamento do Anexo A. Para transmissão dos sinais dos sensores do sistema do campo até o sistema de controle foram utilizados equipamentos com tecnologia sem-fio (*wireless*) em virtude da distância e condições adversas da região que dificultaram a instalação de equipamentos convencionais. Este sistema *wireless* é composto por transmissores de campo e um gerenciador-mestre denominado *Gateway*, que é responsável pela transferência dos sinais para o sistema de controle via protocolo digital Modbus, conforme pode ser visto na Figura 18 e Anexo B.



Figura 18 – Detalhes da instalação do sistema de transmissão *wireless* (transmissor, *gateway* e cartão Modbus).

Para programação, foram utilizados os blocos de controle regulatório disponíveis no SDCD do alto-forno em questão. Esta linguagem caracteriza-se pela existência de blocos pré-configurados para execução de atividades específicas (somas, divisões, filtros, pilhas de dados, contadores, temporizadores, controladores, etc...), conforme pode ser visualizado na Figura 19.

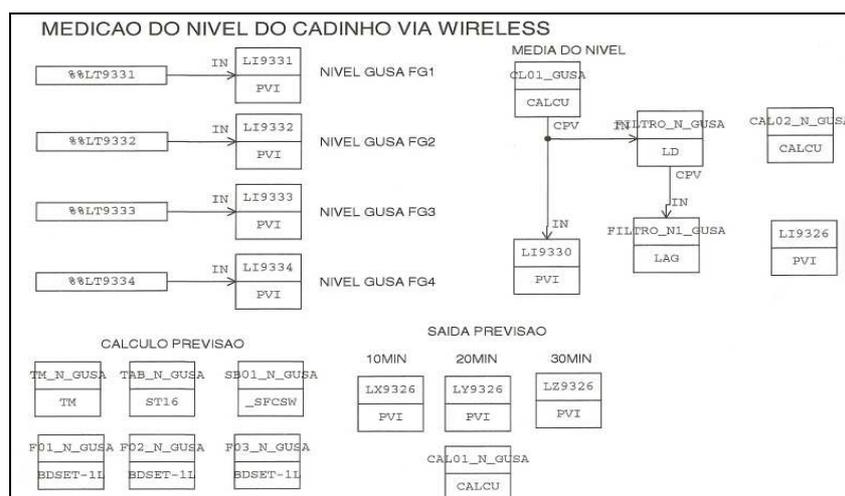


Figura 19 – Tela de programação dos blocos de controle regulatório do sistema de monitoração de nível dos líquidos.

Com todo o sistema integrado e, após alguns ajustes, foram encontrados sinais que apresentavam correspondência às descrições encontradas na literatura especializada, ou seja, sinais que aumentam quando os furos-de-gusa estão fechados e decrescem quando estes se encontram abertos. Sendo assim, esta informação foi disponibilizada de imediato para uso dos operadores da planta pois já apresentam informações importantes do processo. Outra informação importante é que, como os 4 (quatro) sinais obtidos apresentam similaridades, adotamos a média destes sinais para utilização neste trabalho.

Na Figura 20, notamos que o sinal (média dos sinais de campo) apresenta-se como sendo não-estacionário apresentando variância não constante. Isto deve-se à sua componente correlacionada ao estado térmico e químico do cadinho (PRONIN, 1985; MIELENZ *et al*, 2008), e também à boa correspondência entre aberturas e fechamentos dos furos e vazões de escória com o comportamento de subida e descida da FEM, mais uma vez em consonância com a literatura especializada.

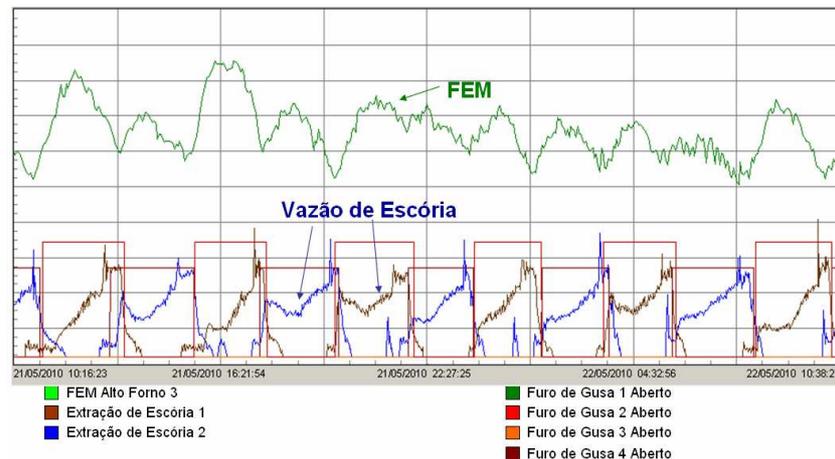


Figura 20 – Comportamento da FEM medida na carcaça do Alto-Forno 3.

Pelo teorema de Shannon, para que um sinal amostrado retenha as características fundamentais do sinal original, é necessário que o tempo de amostragem seja suficientemente curto. O teorema de Shannon diz que um sinal deve ser amostrado com taxa de amostragem de, pelo menos, duas vezes maior que a constante de tempo do processo em análise. Na prática, entretanto, a frequência de amostragem é normalmente escolhida entre 5 e 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados, e não apenas 2 vezes maior (chamada frequência de Nyquist), como exigido pelo teorema de Shannon (AGUIRRE, 2007).

Sendo assim, para todo o processo, optamos pela utilização da taxa de amostragem  $t=10$  minutos para um ciclo médio de corrida de 120 minutos, ficando dentro deste intervalo.

#### 4.3 MODELAGEM DA FEM POR MODELO ARMAX

No início do trabalho optou-se pela modelagem da FEM através de um modelo entrada-saída (ARMAX), o que é bastante razoável, já que temos oscilações significativas no sinal FEM quando ocorrem aberturas ou fechamentos dos furos-de-gusa ou quando há variações na temperatura do gusa. Consideramos, então, um sistema MISO (*multiple input single output*) onde as entradas são os dois furos-de-gusa em operação e a temperatura do ferro-gusa no canal e a

saída do processo é a própria FEM (nível). Na Figura 21, visualizam-se os dados utilizados para esta análise.

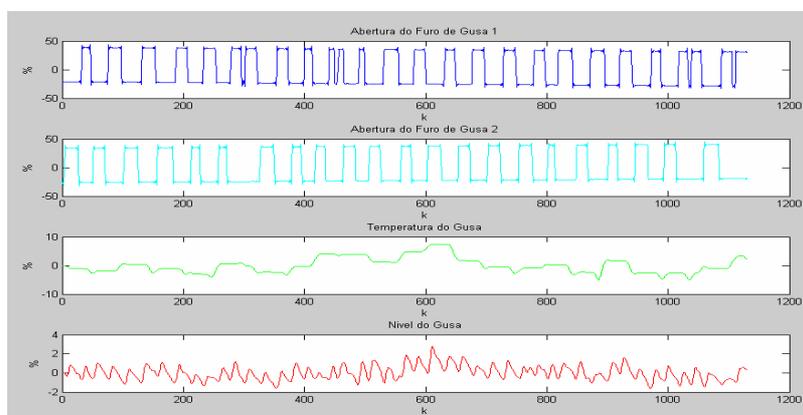


Figura 21 – Dados para modelagem da FEM através modelo ARMAX.

A primeira etapa da modelagem consistiu na análise de correlação dos sinais coletados a fim de identificar quais deles seriam estatisticamente relacionados. Como pode ser visto na Tabela 03, verifica-se que há baixa correlação das entradas com a saída, mesmo sabendo que as aberturas de furo-de-gusa são responsáveis fortemente pelas mudanças de inclinação do sinal de saída.

Tabela 03 – Correlação entre entradas e saída para modelo ARMAX

	Nível
Furo-de-gusa 1	-0,04
Furo-de-gusa 2	-0,02
Temperatura	0,39

Este fenômeno é explicado pela grande quantidade de variáveis que impactam, diretamente ou não, no sinal da FEM medida na carcaça do alto-forno produzindo assim, uma desassociação com variáveis que, pela lógica, seriam fortemente impactantes (LEBED *et al*, 1990).

Na sequência, realizamos a modelagem para um modelo ARMAX(2,2,2), utilizando-se mínimos quadrados, para as três entradas consideradas onde não obtivemos um resultado satisfatório, como pode ser visto na Figura 22.

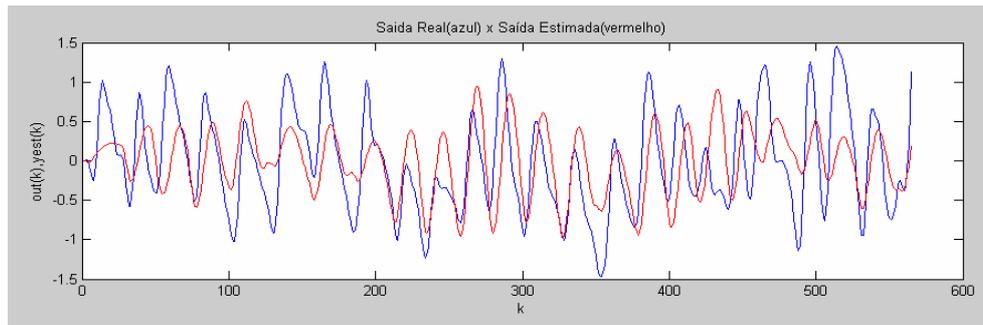


Figura 22 – Modelagem da FEM através de sistema MISO.

Contudo, já foi possível constatar que, pela equação obtida abaixo, a saída do sistema depende fracamente das entradas selecionadas do sistema e fortemente de seus valores passados.

$$Z_t = 1,8573Z_{(t-1)} - 0,9251Z_{(t-2)} - 0,0009In1_{(t-1)} - 0,0005In1_{(t-2)} + \dots \quad (4.1)$$

$$+ 0,0011In2_{(t-1)} - 0,0065In2_{(t-2)} - 0,0263In3_{(t-1)} - 0,0345In3_{(t-2)}$$

onde,

Z é o sinal FEM.

In1 é o furo-de-gusa 1 aberto.

In2 é o furo-de-gusa 2 aberto.

In3 é a temperatura do gusa.

#### 4.4 EXTRAÇÃO DO SINAL DE NÍVEL DE LÍQUIDOS DA FEM

Como já citado anteriormente, a FEM gerada na carcaça do alto-forno é afetada por fenômenos diversos (nível dos líquidos, estado termoquímico do cadinho, estado do homem-morto, etc.). Estes efeitos tornam-se duplamente indesejados para o projeto pois dificultam a análise comparativa entre esgotamentos atuais e passados e também, impossibilitam a identificação por meio de séries temporais sem utilização de transformações matemáticas mais complexas.

Diante disto, para realizarmos a separação do sinal de nível dos líquidos no interior do cadinho da FEM torna-se necessária a compreensão detalhada do sinal através das análises temporal e de frequências. As análises matemáticas foram realizadas com o auxílio do *software* matemático Matlab 6.5.

Pela análise da FEM no tempo (aproximadamente 15 dias), como pode ser visualizado na Figura 23, foram identificados dois comportamentos distintos: O primeiro, de período pequeno, está relacionado com o processo de abertura e fechamento dos furos-de-gusa, e o segundo, de período grande, está relacionado com o estado térmico-químico do cadinho (DUBOVIK *et al*, 1984; BRAMMING; HALLIN, 1989). Desta avaliação, podemos concluir também que o processo de abertura e fechamento dos furos-de-gusa ocorre com períodos de tempo de 100 a 180 min (alto-forno estável).

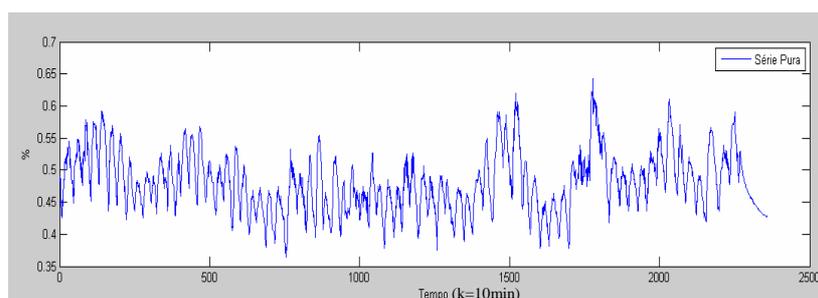


Figura 23 – Análise Temporal da FEM

Pela análise do módulo da transformada rápida de Fourier (KUO,1995), identificou-se que existem algumas regiões de frequências dominantes no sinal, mostradas na Figura 24. De uma forma geral, temos que as frequências muito baixas (muito próximas de zero) estão relacionadas com a média do sinal e devem ser descartadas. As frequências médias estão relacionadas com as aberturas e fechamentos dos furos-de-gusa. As frequências altas possuem densidades espectrais bem mais distribuídas e estão relacionadas, principalmente, aos ruídos de medição.

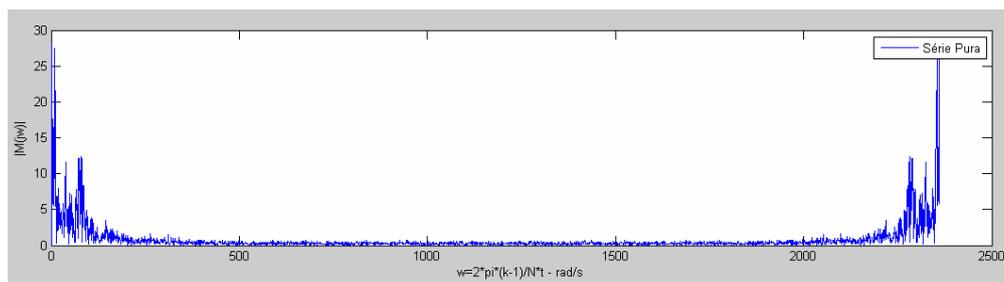


Figura 24 – Transformada de Fourier da FEM.

Analisando-se o módulo da transformada de Fourier com foco maior na região de interesse, conforme pode ser visualizado na Figura 25, verificou-se que existem três bandas de frequências predominantes: baixas frequências (períodos entre 20 e 60 horas), médias frequências (períodos entre 300 e 350 min) e altas frequências (períodos entre 100 e 180 minutos). As primeiras, possivelmente, representam o estado termoquímico do cadinho e as últimas, estão relacionadas com o processo de abertura e fechamento dos furos-de-gusa. Para as frequências médias encontradas, não foram identificadas relações diretas no processo. Além disso, é importante ressaltar que estas frequências médias não foram descritas em nenhuma literatura especializada.

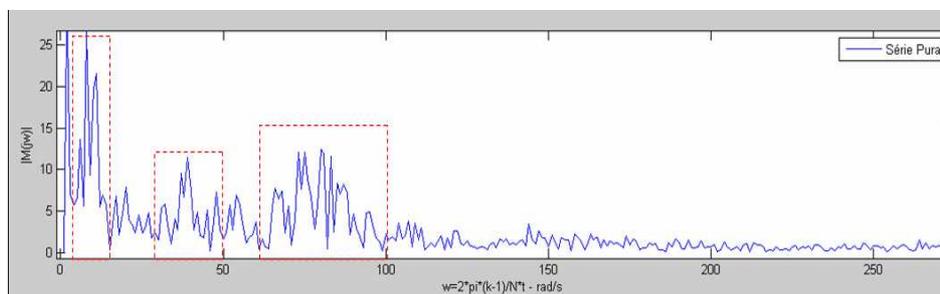


Figura 25 – Transformada de Fourier da FEM - Detalhes.

Com base nas análises temporal e de frequências, realizou-se a filtragem digital do sinal centralizada nas frequências de interesse (aberturas e fechamentos dos furos-de-gusa) mostrada na Figura 26. Esta filtragem foi realizada, no sistema de controle, através da associação de filtros passa-baixas e passa-altas de 1ª ordem devido limitação do sistema de controle digital do alto-forno.

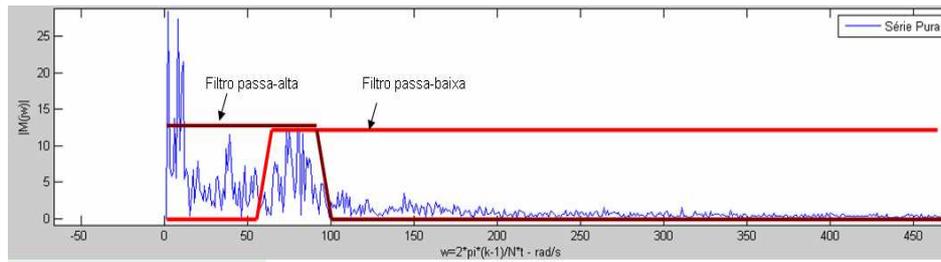


Figura 26 – Filtragem do sinal de líquidos via filtros de 1ª ordem.

Após esta filtragem, o sinal obtido apresentou o comportamento, no domínio do tempo, apresentado na Figura 27. Nota-se que não há mais dependência do sinal com o estado termoquímico do cadinho (oscilações de baixa frequência) e o sinal está estacionário (vide capítulo 3.2.4), variância constante e média constante e próxima de zero, condições estas que habilitam a identificação do mesmo via teoria de séries temporais.

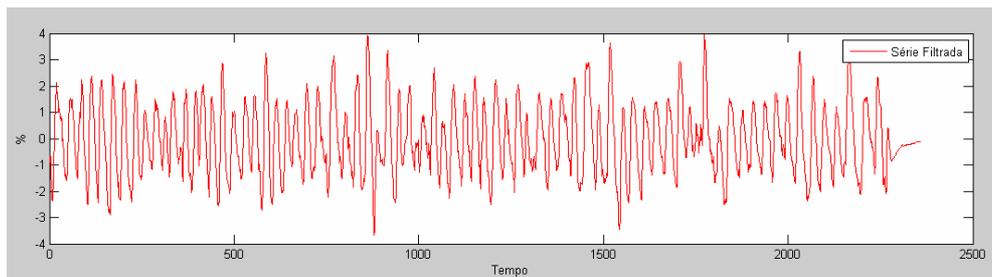


Figura 27 – Desempenho do sinal filtrado da FEM no domínio do tempo.

Na Figura 28, temos o mesmo sinal filtrado apresentado via transformada de Fourier demonstrando que houve atenuação significativa do sinal nas frequências que não estavam no intervalo especificado dos filtros digitais.

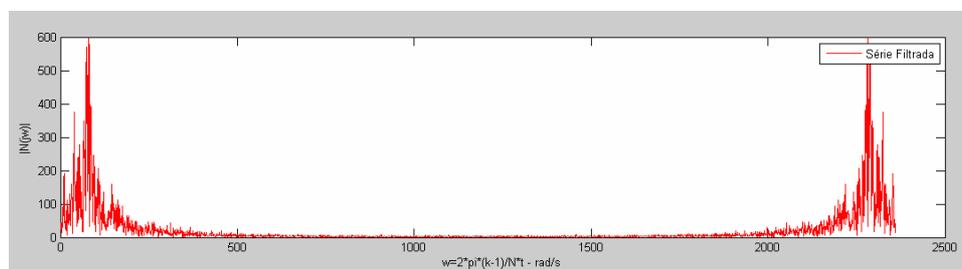


Figura 28 – Desempenho do sinal filtrado da FEM no domínio da frequência.

Outro dado interessante é a visualização de comportamentos intrínsecos ao processo até então “invisíveis”, como o que pode ser visualizado na Figura 29. Na ocasião, houve uma parada na produção do alto-forno e, enquanto que a FEM decresceu (efeito térmico - esfriamento da planta), o sinal filtrado subiu gradativamente até parar. Este comportamento é esperado no interior do alto-forno pois, durante a parada da planta, o processo de redução do minério de ferro continua ocorrendo por algum tempo e, conseqüentemente, há ainda chegada de material líquido no cadinho.

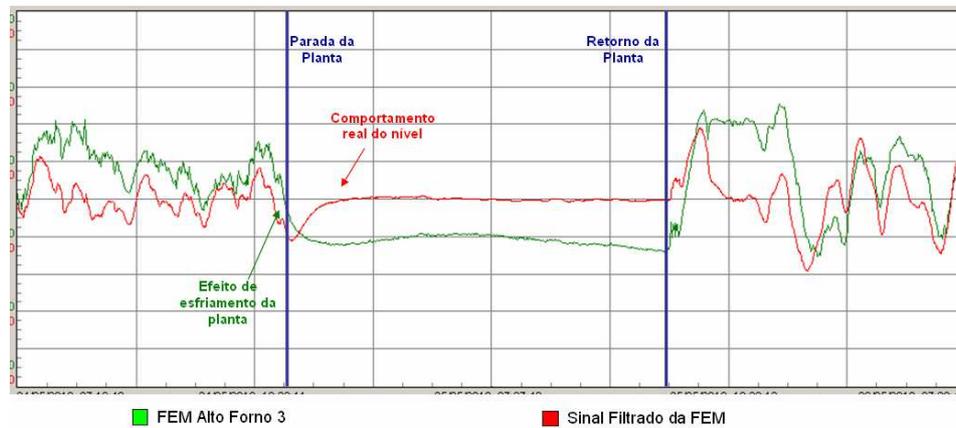


Figura 29 – Comportamento do sinal filtrado da FEM durante uma parada na produção do alto-forno.

Por fim na Figura 30, verifica-se uma instabilidade operacional, onde houve alterações significativas no processo em que o sinal filtrado representou de forma eficaz o comportamento dos líquidos no interior do alto-forno sem interferências termoquímicas, ou seja, alterações na média do sinal. Nesta ocasião, houve alteração do estado térmico do cadinho devido, possivelmente, elevação de taxa de injeção de combustíveis (coque e carvão) no alto-forno.

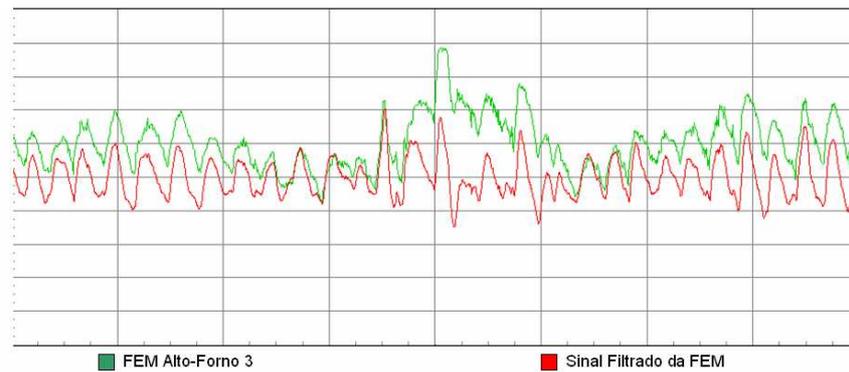


Figura 30 – Comportamento do sinal filtrado da FEM durante uma instabilidade operacional do alto-forno.

#### 4.5 MODELAGEM DO NÍVEL DOS LÍQUIDOS POR SÉRIES TEMPORAIS

Com o sinal base já enquadrado nas características necessárias à identificação via modelos ARIMA, inicia-se o processo de identificação do sinal. Este processo é constituído pelas seguintes etapas: análise descritiva, análise de necessidade de transformação e identificação da classe de modelo através da autocorrelação e autocorrelação parcial.

Logo após filtragem, definiu-se pela transformação do sinal da FEM de mV para percentual de nível. Para isto, tomamos como base as oscilações mínimas e máximas do sinal ao longo de um período longo (aproximadamente um mês), tomando o valor de 20% como o valor médio dos mínimos e 80% como sendo o valor médio dos máximos. A partir de então, durante o desenvolvimento do trabalho, utilizamos este sinal percentual.

A análise descritiva consiste na avaliação dos dados estatísticos (média, desvio-padrão, variância, histograma, etc...) do conjunto de dados visando prover maior conhecimento sobre o comportamento do sinal. Na Figura 31, temos o histograma do sinal de nível filtrado apresentando uma distribuição normal, assim como a média, mediana, desvio padrão e variância. A análise do histograma ratifica que o conjunto de dados pode ser utilizado para

identificação do nível em um processo estatisticamente válido (MORETTIN, TOLOI, 2006).

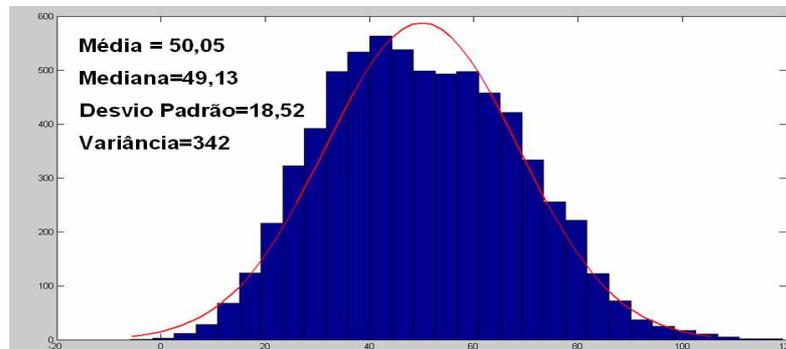


Figura 31 – Análise descritiva do sinal de nível de líquidos do alto-forno.

De acordo com (MORETTIN; TOLOI, 2006), realizamos o teste da estacionaridade visando identificar a necessidade de transformações lineares (derivações) para melhor identificação da série. Foi realizada a análise para 60 períodos de tempo com médias de 8 horas (constante de tempo estimada para transformação das matérias primas em produto final no alto-forno), totalizando assim, 20 dias de operação. Como pode ser visualizado na Figura 32, nota-se claramente a independência da média do sinal em relação a suas variações de amplitude (diferença entre mínimos e máximos) ao longo do tempo, caracterizando-se assim um sinal estável e sem necessidade de transformação.

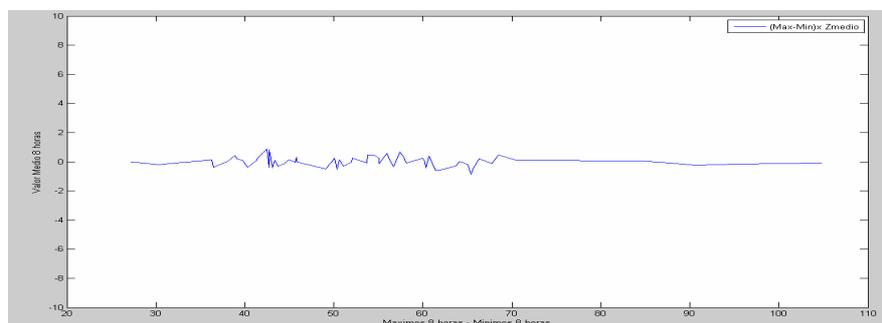


Figura 32 – Avaliação de estabilidade do sinal de nível de líquidos.

Como citado no Capítulo 3 (itens 3.4.2 e 3.4.3), comparamos graficamente as autocorrelações e autocorrelações parciais do sinal em análise, Figuras 33 e 34 respectivamente, com as características teóricas dos modelos ARMA contidos

na Tabela 02 do mesmo capítulo (item 3.4.3). Nota-se que os intervalos de confiança (valores a partir de onde a série é considerada ruído branco) estão especificados como 95% (02 desvios-padrão).

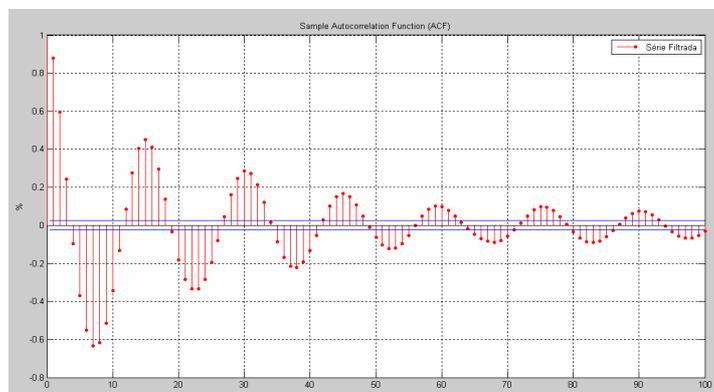


Figura 33 – Autocorrelação do sinal de nível de líquidos do alto-forno.

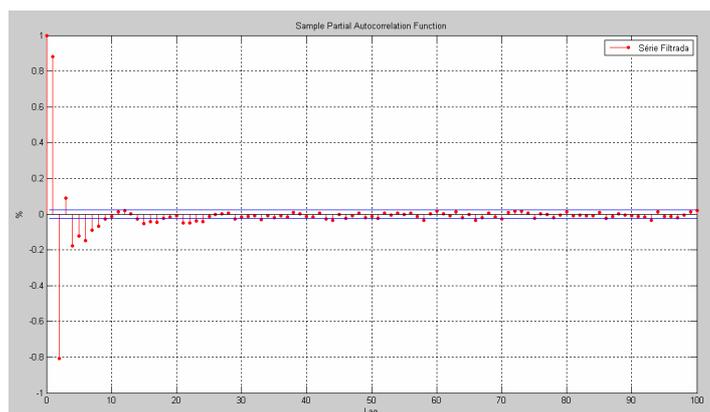


Figura 34 – Autocorrelação Parcial do sinal de nível de líquidos do alto-forno.

Notamos que a ACF apresentou um comportamento similar ao de senóides amortecidas, enquanto a PACF apresentou um corte abrupto a partir do *lag* 8. Com base nestes gráficos definimos que a classe de modelos autoregressivos (AR) puros é a que melhor se enquadra neste comportamento. Sendo assim, tomaremos como base o modelo AR de 8ª ordem, ou AR(8).

Com a utilização do *software* matemático Matlab, realizamos a identificação dos parâmetros do modelo autoregressivo de 8ª ordem (AR(8)) pelo método dos mínimos quadrados do Capítulo 3 (3.18), para o caso particular sem entradas externas, onde obtivemos o seguinte resultado:

$$\hat{Z}_t = 1.86Z_{t-1} - 1.23Z_{t-2} + 0.36Z_{t-3} - 0.09Z_{t-4} + 0.07Z_{t-5} + 0.01Z_{t-6} + \dots \quad (4.1) \\ - 0.15Z_{t-7} + 0.17Z_{t-8}$$

O polinômio encontrado em (4.1) apresenta raízes dentro do círculo unitário, como pode ser visualizado na Figura 35, caracterizando-se assim como um modelo estacionário, conforme descrito em (MORETTIN; TOLOI,2006; SOUZA; CAMARGO, 2004).

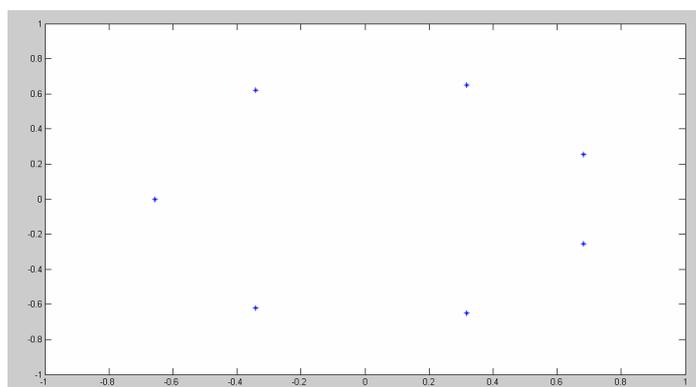


Figura 35 – Raízes do polinômio AR(8) do nível dos líquidos.

A etapa seguinte foi a simulação, com base no modelo (4.1), da previsão para 01(um) passo à frente, ou seja, 10 minutos de previsão. Esta previsão apresentou estimativas muito boas, conforme pode ser visto na Figura 36.

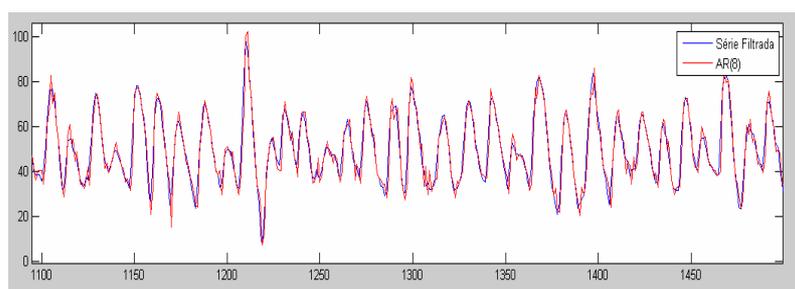


Figura 36 – Simulação de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente.

Temos nas Figuras 37 e 38 a distribuição dos resíduos (diferenças entre os valores previstos e reais) e suas respectivas autocorrelações mostrando que este modelo apresenta erros relativamente baixos e, ainda, algumas dependências temporais, mesmo que pequenas.

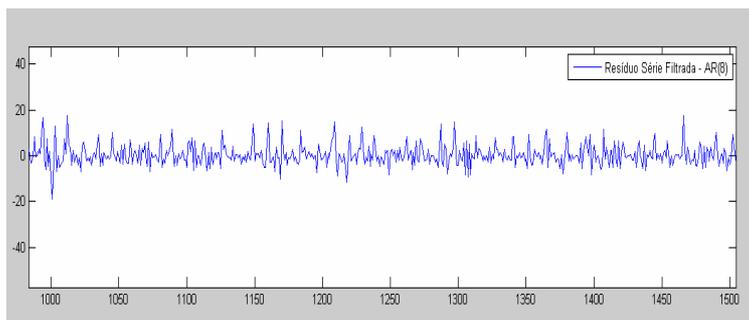


Figura 37 – Resíduos de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente.

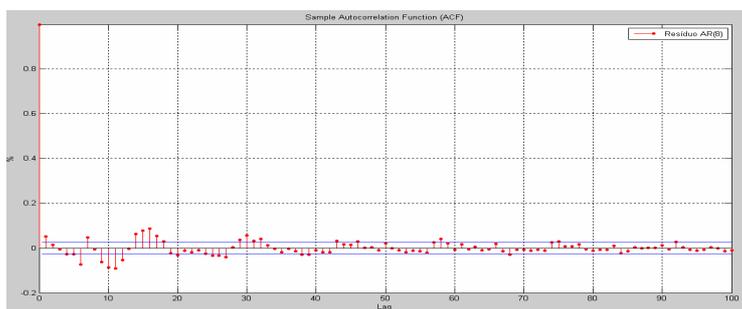


Figura 38 – Autocorrelações dos resíduos de previsão do modelo AR(8) para 10 minutos à frente.

#### 4.6 VALIDAÇÃO DO MODELO

A validação do modelo consiste na análise dos resíduos com o intuito de se encontrar características (correlações) que o descaracterizem como um ruído branco. Em caso de insucesso nesta tarefa, o modelo é considerado adequado. Com este objetivo utilizamos os métodos apresentados na Seção 3.7.

Pela análise da autocorrelação da Figura 38, nota-se que existem alguns *lags* de ordens maiores que, aparentemente, possuem alguma significância. Sendo assim, realizaremos os testes para modelo sobreposto (Seção 3.7.3) onde definimos o modelo de ordem 15 para comparação. Verificamos que a elevação da ordem do modelo trouxe uma redução no erro médio de previsão de 37,3, para o modelo AR(8) e 33,6, para o modelo AR(15), ou seja, 10% de queda. Sendo assim, nosso novo modelo AR(15) para a previsão 01 passo à frente é dado por:

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{t+1} = & 1.72Z_t - 1.12Z_{t-1} + 0.32Z_{t-2} - 0.1Z_{t-3} + 0.07Z_{t-4} - 0.04Z_{t-5} + \dots \\ & + 0.02Z_{t-6} - 0.01Z_{t-7} + 0.03Z_{t-8} + 0.01Z_{t-9} + 0.01Z_{t-10} + 0.02Z_{t-11} + \dots \\ & + 0.04Z_{t-12} - 0.01Z_{t-13} + 0.05Z_{t-14} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Como nosso foco é a previsão de 03 (três) passos à frente, ou seja, 30 minutos de previsão, partimos para as simulações com a equação (4.2) utilizando este horizonte de previsão. Nas Figuras 39 e 40, temos o resultado deste modelo para 30 minutos e seus resíduos, respectivamente. É importante observar que a análise da autocorrelação dos resíduos para previsões acima de 01 horizonte de previsão torna-se ineficaz pois temos dependência obrigatória entre os termos do modelo (MORETTIN; TOLOI, 2006).

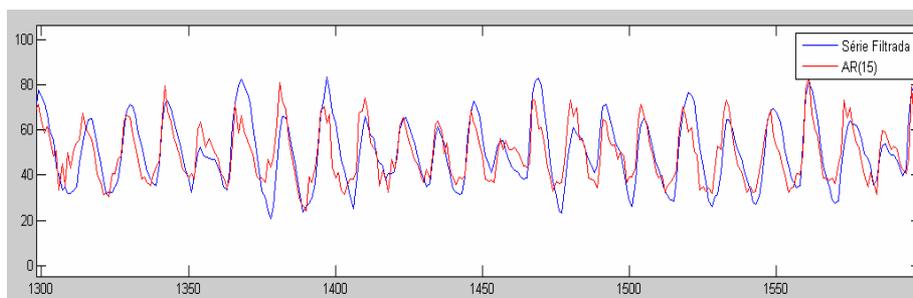


Figura 39 – Simulação de previsão do modelo AR(15) para 30 minutos à frente.

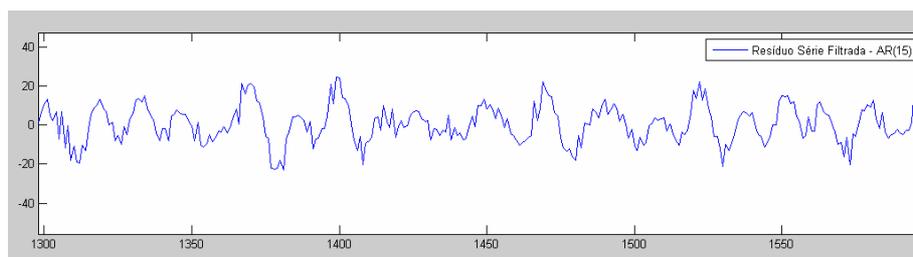


Figura 40 – Simulação de resíduo da previsão do modelo AR(15) para 30 minutos à frente.

Nota-se que temos agora uma perda de qualidade de previsão acentuada para 03 passos à frente pois o EMQP para este horizonte é de 194. Para contornar este problema, utilizamos a equação Diophantina (3.22) para encontrar um modelo que minimizasse o erro de previsão. O modelo otimizado encontrado foi um AR(16):

$$\begin{aligned} \hat{Z}_{t+3} = & -0.47Z_t - 0.23Z_{t-1} - 0.01Z_{t-2} - 0.12Z_{t-3} - 0.29Z_{t-4} - 0.08Z_{t-5} + \dots \\ & - 0.11Z_{t-6} - 0.08Z_{t-7} + 0.17Z_{t-8} + 0.04Z_{t-9} - 0.01Z_{t-11} + \dots \\ & - 0.21Z_{t-12} - 0.06Z_{t-13} \end{aligned} \quad (4.3)$$

Este modelo apresentou previsões mais precisas, conforme pode ser visto na Figura 41 e 42, com redução de 55% (194 do AR(15) contra 145 da Diophantina) no erro médio quadrático de previsão em relação ao modelo (4.2).

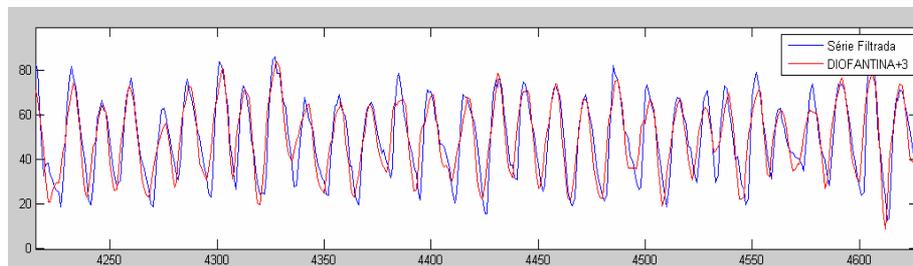


Figura 41 – Simulação de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diophantina para 30 minutos à frente.

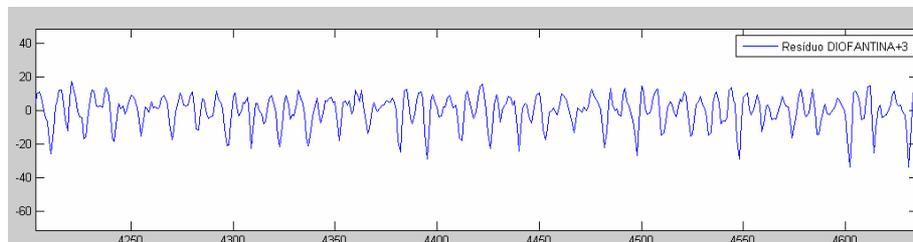


Figura 42 – Simulação de resíduo da previsão do modelo AR(16) otimizado via Diophantina para 30 minutos à frente.

Nota-se também, que há boa precisão na previsão dos instantes onde haverá volume máximo, ou seja, melhor momento para abertura dos furos-de-gusa, mesmo havendo, em alguns momentos, desvios significativos em seus valores absolutos.

Mesmo após otimização, e com um resultado considerado satisfatório, ainda temos uma elevação de mais de 300% nos erros médios quadráticos de previsão se compararmos as previsões de 10 e 30 minutos à frente.

Com base nos resultados satisfatórios obtidos com o modelo (4.3), realizamos o teste de hipótese (3.32) para avaliar se todos os parâmetros são significativos. Para o nível de significância do teste escolhido de 5% ( $\alpha=0,05$ ),  $\mu$  igual a -0,1123,  $n$  igual a 13 e  $\sigma$  igual a 0,1611, em nenhum dos casos a hipótese nula foi rejeitada, ou seja, todos os parâmetros são significativos e devem ser mantidos no modelo.

#### 4.7 PREVISÃO DO NÍVEL DOS LÍQUIDOS NO CADINHO

Após os resultados satisfatórios na simulação, implantamos o sistema (4.3) no processo real para confirmação dos desempenhos. Nas Figuras 43 e 44, temos o resultado da previsão e resíduos, respectivamente.

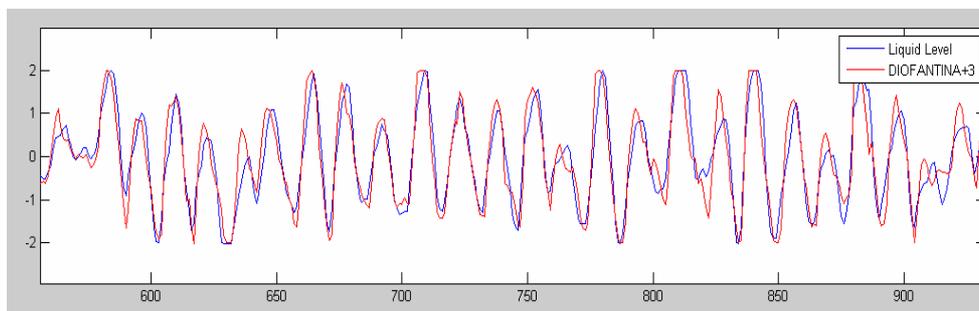


Figura 43 – Resultados reais de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.

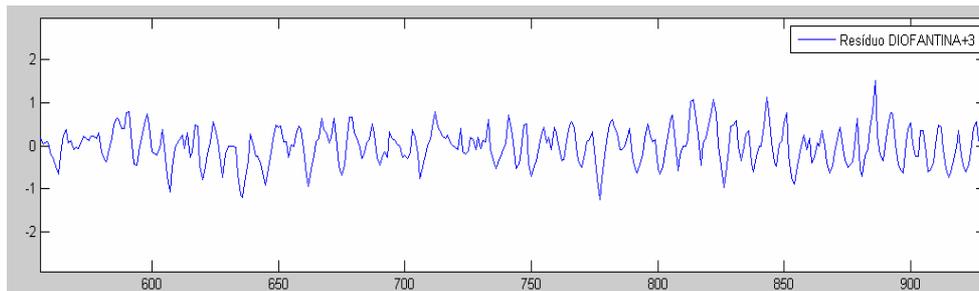


Figura 44 – Resultados reais de resíduo da previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.

Constata-se que os resultados no processo produtivo foram muito próximos da simulação, confirmando assim que os procedimentos de coleta de dados, filtragem e identificação estão coerentes. Na Figura 45, visualizamos as autocorrelações e autocorrelações parciais dos resíduos de previsão. Apesar das dependências naturais entre os termos devido à previsão de mais de um passo à frente, notamos que os termos apresentam dependências não tão acentuadas.

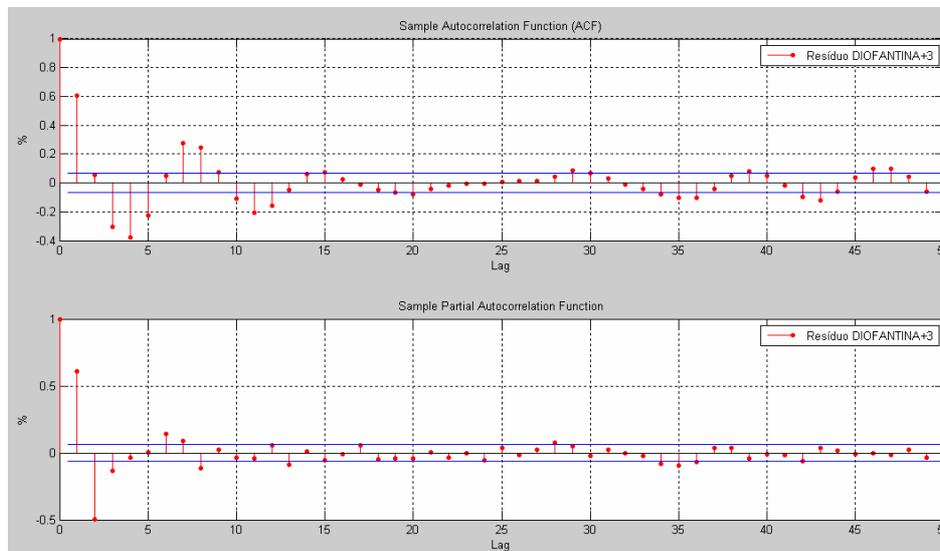


Figura 45 – Autocorrelações dos resíduos reais de previsão do modelo AR(16) otimizado via Diofantina para 30 minutos à frente.

Vale a pena ressaltar que a implantação da previsão via séries temporais no sistema digital de controle do alto forno em estudo foi realizado com a utilização de recursos simples como montagens de pilhas de dados tipo FIFO (*first-in first-out*) para armazenamento dos valores passados, blocos de cálculos

básicos, etc.. Estes recursos são necessários pois, geralmente, os sistemas de controle industriais não possuem recursos matemáticos sofisticados, dificultando um pouco o trabalho de implantação.

Após validação, o sistema de predição foi liberado para os operadores e está atualmente sendo utilizado de forma sistêmica.



**CONCLUSÃO**



## 5 CONCLUSÃO

O conhecimento e controle do nível dos líquidos no interior do cadinho do Alto-forno é um importante parâmetro operacional, pois envolve a possibilidade de otimização de processos e conseqüentemente, redução de custos.

A combinação de recursos computacionais simples (blocos básicos do sistema de controle) e equipamentos de tecnologia avançada (sistema *wireless*) durante a montagem do sistema, possibilitou a elaboração de um procedimento de instalação que pode ser utilizado em outros altos-fornos sem grandes dificuldades e com resultados similares (sinal coerente com o processo).

A separação dos sinais da força eletromotriz (FEM) entre componentes térmicas e nível do cadinho proporcionou uma nova visão sobre o estudo do problema. A partir do sinal filtrado, foi possível a visualização de alguns comportamentos do nível no interior do cadinho até o momento não representados pela FEM “pura”, tais como avaliação do nível absoluto no cadinho, estado térmico do cadinho, etc.

A modelagem matemática do nível dos líquidos através das séries temporais permitiu um maior conhecimento da dinâmica do processo, além da possibilidade de previsibilidade deste para um horizonte de previsão próximo (no referido estudo foi alcançado 30 minutos à frente) com boa precisão. Com base nesta informação, os operadores possuem agora, um recurso adicional para tomadas de decisão em situações de instabilidade operacional.

É importante ressaltar que a partir deste trabalho, pode-se implantar modelagens “caixa-preta” em outros altos-fornos por técnicos ou engenheiros, apenas com conhecimentos relativamente simples sobre análises de séries temporais e sem a necessidade de se ter profundo conhecimento do alto-forno e suas reações internas, como ocorre em modelagens “caixa-branca”.

O modelo apresentado pode ter aplicação em diversos tipos de trabalho, tais como: entrada para softwares especialistas (otimizadores de processo); prolongamento de vida útil do cadinho em virtude da possibilidade de otimização da quantidade de aberturas e fechamentos dos furos de gusa; treinamento de operadores em sistemas de simulação mais realistas e a utilização do modelo obtido como base para estudos futuros sobre a dinâmica dos líquidos no interior do cadinho e suas relações com as diversas variáveis do processo de produção de ferro-gusa.

Outro fato importante é que, o modelo obtido ainda apresenta oportunidades de melhorias tais como: redução do erro médio quadrático, aumento do horizonte de previsão, etc. Obviamente não foi possível levar à exaustão todas as idéias desenvolvidas nesta dissertação, contudo, a exploração das ferramentas de análise aqui apresentadas tornaram possível a percepção de alguns trabalhos a serem desenvolvidos, os quais certamente proporcionarão um grande enriquecimento do conhecimento humano acerca desse tema, são eles:

- Implantação de otimizadores de parâmetros para os modelos ARMA dos sinais de níveis dos líquidos (lógica fuzzy, redes neurais, algoritmos genéticos, etc.);
- Realizar investigação sobre técnicas de análises de séries temporais não lineares (NARMA) visando englobar as características do processo que não foram capturadas no modelo linear.



# **REFERÊNCIAS**



## 6 REFERÊNCIAS

AGUIRRE L.A. **Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas Lineares e Não-lineares Aplicadas a Sistemas Reais**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2007.

BARROS M. **Processos Estocásticos**. Rio de Janeiro: Papel Virtual Editora, 2004.

BOX G.E.P., JENKINS G.M., REINSEL G. **Time Series Analysis: Forecasting and Control**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 3rd edition, 1994.

BRAMMING M., HALLIN M. Development of new techniques for blast furnace process control. **S.S.A.B. Lulea Works**, Sweden.1989.

BRANNBACKA J., SAXEN H. Dynamic Model of Liquid Levels in Blast Furnace Hearth. **Scandinavian Journal of Metallurgy**, 34: 116-121. 2005.

BRANNBACKA J., SAXEN H. Novel Model for Estimation of liquid Levels in the Blast Furnace Hearth. **Chemical Engineering Science**, 59: 3423-3432. 2004.

DOROFEEV V.N., NOVOKHATSKII A.M. Origin of difference in electrical potentials on blast furnace shell. **Steel in the U.R.S.S.**,1.1984.

DUBOVIK V.Y *et al.* Automatic monitoring of the state of the blast furnace wall. **Izv. V.U.Z. Chernaya Metall.**1982.

FUJIHARA F.K. *et al.* Aspectos Tecnológicos Relativos à preparação de Carga e Operação de Alto Forno. **Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais – ABM**. 1994.

GEERDES M., VLIET C.V.D., TOXOPEUS H., MEDEIROS F.T.P. **Prática Modernas para Operação de Altos-fornos**. São Paulo: Editora Universidade Deft, 2007.

HAMILTON J.D. **Time Series Analysis**. New Jersey: Princeton University Press, 1994.

LEBED P.K., SAFINA L.A., DEMIDENKO V., SEMENKO A.Y., POCHEKAILO I.E. Evaluating work of blast furnace hearth from the nature of EMF variation. **Steel in the U.R.S.S.**, 20. 1990.

LEICESTER H.M. Germain Henri Hess and the Foundations of Thermochemistry. **The Journal of Chemical Education**, 28: 581–583. 1951.

LEVINE D.M., BERENSON M.L., STEPHAN D., *et al*: **Estatística: Teoria e Aplicações - Usando Microsoft Excel Português**. Rio de Janeiro: LTC.2005.

KUO B.C. (1995): **Automatic Control Systems – 7th Edition**. New Jersey: Prentice Hall.1995.

MERTINS A. **Signal Analysis: Wavelets, Filter Banks, Time-Frequency Transforms and Applications**. Chichester: John Wiley & Sons. 1999.

MIELENZ O., KRUNER A., KOCHNER H. Monitoramento avançado do nível de enchimento de ferro líquido e posição neutra dentro do forno. **MPT Edição Brasileira**,1. 2008.

MORETTIN A.P., TOLOI M.C.T. **Análise de Séries Temporais**. São Paulo: Edgard Blucher. 2006.

NIGHTINGALE R.J., TANZIL F.W.B.U. Blast furnace hearth condition monitoring and taphole management techniques. **La Revue de Métallurgie – CIT**, 6: 533-540. 2001.

PETERS M. *et al.* Determination of Liquid Level in the hearth of the Blast Furnace, **2001 Ironmaking Conference Proceedings**. Baltimore,USA. 2001.

POST J. R. *et al.* Hot Metal Flow in the Blast Furnace Hearth-Thermal and Carbon Dissolution Effects on Buoyancy, Flow and Refractory Wear. **Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries CSIRO**.Melbourne, Australia. 2003.

PRONIN P.I. Variation in the electrical current voltage in the casting of blast furnace, **IZV V.U.Z. Chernaya Metall**, 5. 1985.

RADILOV S.V. Electrical current in the blast furnace and its use for blast furnace monitoring. **Stal**, 3. 1985.

RUFF W. Electricity in the blast furnace. **Stahl und Eisen**, 1. 1927.

SODERSTOM T. **Discrete-time Stochastic Systems: Estimation and Control**. Cambridge: Prentice Hall. 1994.

SOUZA R.C., CAMARGO M.E. **Análise e Previsão de Séries Temporais – Os Modelos ARIMA**. Rio de Janeiro: Gráfica e Editora Regional. 2004.

WEI W.W.S. **Time Series Analysis: Univariate and Multivariate Methods**. New York: Pearson Education Inc. 2006.

WRIGHT B. *et al.* Assessment of Refractory Condition in a Blast Furnace Hearth Using Computational Fluid Dynamics. **Third International Conference on CFD in the Minerals and Process Industries – CSIRO**. Melbourne, Austrália. 2003.



**ANEXO A**



### ANEXO A - SISTEMA DE CONTROLE DO ALTO-FORNO 3

O sistema digital de controle do Alto-Forno 3 da Arcelormittal Tubarão modelo Centum CS da Yokogawa possui a arquitetura apresentada na Figura 46.

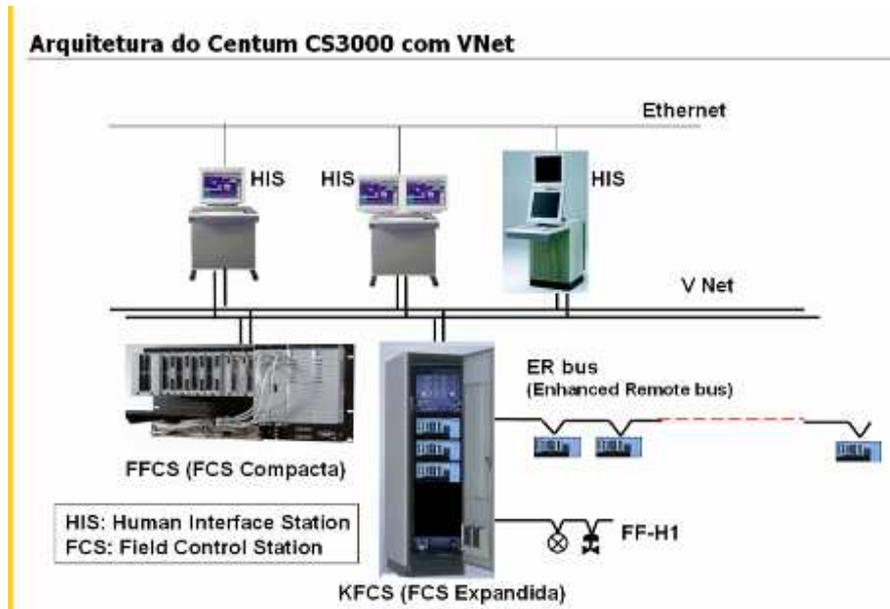


Figura 46 – Arquitetura SDCD Alto-Forno 3

A Figura 47 descreve a capacidade de gerenciamento dos diversos componentes que compõem o sistema.

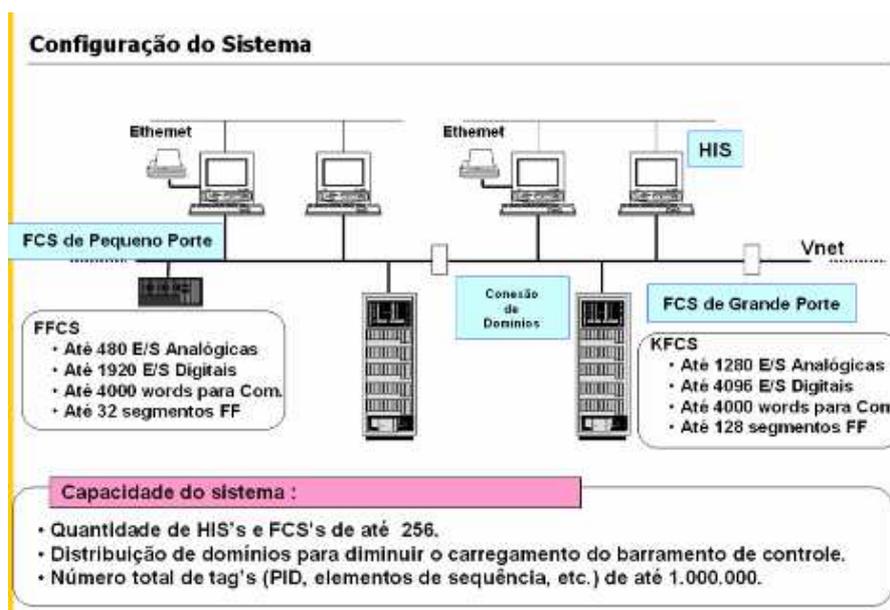


Figura 47 – Configuração do SDCD Alto-Forno 3

Na Figura 48 temos uma imagem da estação de pequeno porte do sistema Centum CS.

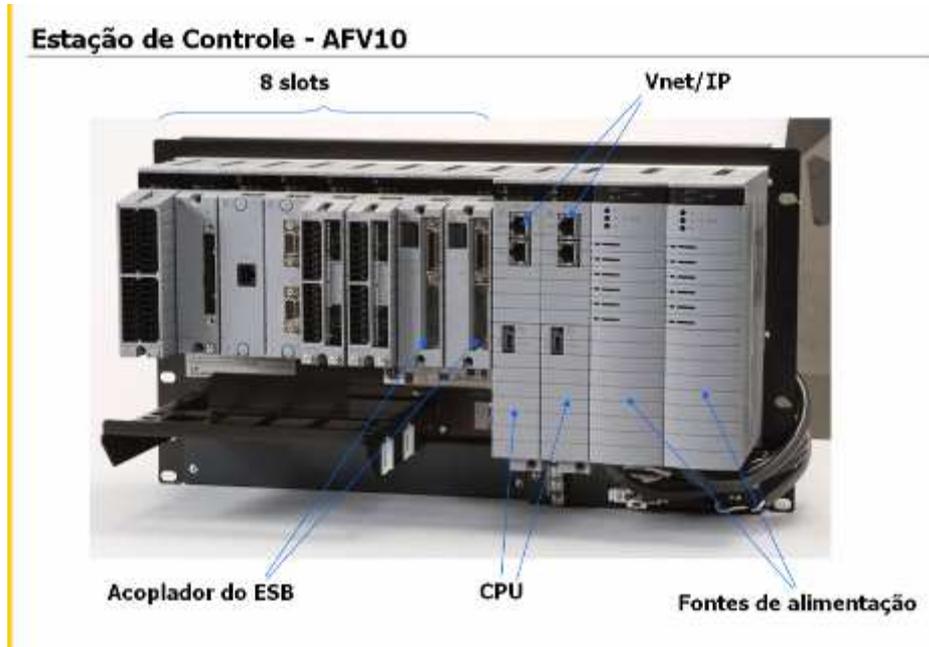


Figura 48 – Estação de Controle do SDCD Alto-Forno 3

O sistema de controle do Alto-Forno 3 possui uma quantidade limitada de blocos de função prédefinidos. Sendo assim, temos que realizar a implantação de funções e sistemas com base nestes blocos. Nas Figuras 49, 50 e 51, temos a relação de todos os blocos disponíveis.

**Blocos de Controle Regulatório**

Block Type	Model	Name
Input Indicator	PI1	Input indicator block
	PI1-OW	Input indicator block with deviation alarm
Controller	PI-D	PI-D controller block
	PI-HLD	Sampling PI controller block
	PI-E-SW	PI-D controller block with switch
	ONOFF	Two-position ON/OFF controller block
	ONOFF-G	Three-position ON/OFF controller block
	PI-E-TR	Three-position lag ON/OFF controller block
	PD-MR	PD controller block with manual reset
	PI-BLEND	Blending PI controller block
	PI-E-STD	Soft-starting PI-D controller block
	Manual Loader	MLD
MLD-PH		Manual loader block with input indicator
MLD-SW		Manual loader block with Auto/Man SW
MC-2		Two-position motor control block
Signal Setter	MC-3	Three-position motor control block
	RA10	Ratio sett block
	RS-L12	TS-zone program set block
Signal Limiter	BS-TR-2	Flow-timing batch set block
	BS-TR-3	Weight-timing batch sett block
Signal Selector	WELLIM	Velocity limiter block
	SS-HVAL	Signal selector block
Signal Distributor	AS-HVAL	Auto selector block
	SS-DUAL	Dual mode signal selector block
	ROUT	Cascade signal distributor block
Pulse Count Input	RSOLIM	Feedforward signal averaging block
	RCPL	Non-inverting pulse count output block
	SPLIT	Control signal splitter block
Alarm	PFC	Pulse count input block
	ALM-R	Ramp over/under alarm block (*1)

Figura 49 – Blocos de Controle do SDCD Alto-Forno 3

**Blocos de Cálculo**

Block Type	Model	Name
Arithmetic Calculators	ADD	Addition block
	MUL	Multiplication block
	DIV	Division block
	AWE	Average block
Analog Calculators	SQRT	Square root block
	EXP	Exponential block
	LAG	First-order lag block
	INTEG	Integration block
	LD	Derivative block
	RAMP	Ramp block
	LDLAG	Lead-lag block
	DELAY	Dead-time block
	DELAY-C	Dead-time compensation block
	AWE-M	Moving-average block
	AWE-C	Cumulative-average block
	FUNC-VOL	Variable two-segment function block
	TPCFL	Temperature and pressure correction block
	ASTM	ASTM correction block: Old AIS
	ASTM	ASTM correction block: New AIS
General Purpose Calculators	CALCU	General purpose calculation block
	CALCUC	General purpose calculation block with string I/O
Auxiliary	SW-3P	Three-pole three-position selector switch block
	SW-1P	One-pole one-position selector switch block
	DGP-16	Selector switch block for 16 data
	DGP-16C	Selector switch block for 16 string data
	DGET	Data setblock
	DGET-PVI	Data setblock with input indicator
Batch Data	BDG-T-1L	One-shot data setblock
	BDG-T-1C	One-shot string data setblock
	BDG-T-2L	Two-shot data setblock
	BDG-T-2C	Two-shot string data setblock
	BD-L	Batch data acquisition block
	BD-L-C	Batch string data acquisition block

Figura 50 – Blocos de Cálculo do SDCD Alto-Forno 3

**Blocos de Controle Sequencial**

Block Type	Model	Name
Sequence Table	ST-16	Sequence table block
	ST-16E	Rule extension block
Logic Chart	LC-64	Logic chart block
SFC	_SFC-SW	Three-position switch SFC block
	_SFC-PH	Position SFC block
	_SFC-AS	Analog SFC block
Switch Instrument	SI-1	Switch instrument block with 1 input
	SI-2	Switch instrument block with 2 inputs
	SO-1	Switch instrument block with 1 output
	SO-2	Switch instrument block with 2 outputs
	SIO-11	Switch instrument block with 1 input 1 output
	SIO-12	Switch instrument block with 1 input 2 outputs
	SIO-21	Switch instrument block with 2 inputs 1 output
	SIO-22	Switch instrument block with 2 inputs 2 outputs
	SIO-2P	Switch instrument block with 1 input 2 one-shot outputs
	SIO-22P	Switch instrument block with 2 inputs 2 one-shot outputs
Sequence Element 1	TM	Timer block
	CTS	Software counter block
	GTP	Pulse train input counter block
	CI	Code input block
Sequence Element 2	CO	Code output block
	RE	Relational expression block
Sequence Element 2	RS	Resource scheduler block
	VM	Valve monitoring block (1)

Figura 51 – Blocos de Controle Sequencial do SDCD Alto-Forno 3

Nas próximas páginas estão detalhados os principais blocos do SDCD utilizados neste projeto.

## D1.2 Input Indicator Block (PVI)

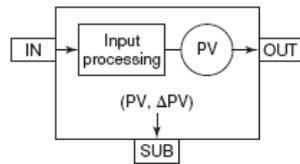
This function block displays an input signal from the I/O modules or from the other blocks as process variable (PV). It can also output the process variable (PV) from the OUT terminal.

This block may be used only for indicating the process variable.

### ■ Input Indicator Block (PVI)

#### ▼ Connection

The figure below shows a function block diagram of the Input Indicator Block (PVI):



D010201E.EPS

Figure Function Block Diagram of Input Indicator Block (PVI)

The table below shows the connection method and connected destination of the I/O terminals of the Input Indicator Block (PVI):

Table Connection Method and Connected Destination of I/O Terminals of Input Indicator Block (PVI)

I/O terminal		Connection method			Connection destination		
		Data reference	Data setting	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
IN	Measurement input	×		△	×		×
OUT	Process variable output		×	△	×		×
SUB	Auxiliary output		×	△	×		×

D010202E.EPS

×: Connection allowed  
 Blank: Connection not allowed  
 △: Connection allowed only when connecting to a switch block (SW-33, SW-91) or inter-station data link block (ADL).

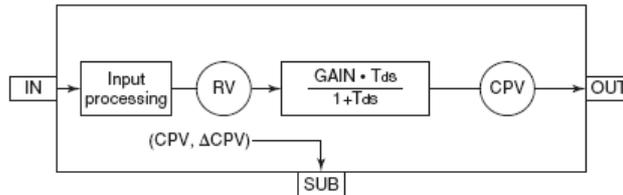
## D2.12 Derivative Block (LD)

The Derivative Block (LD) is used when obtaining the derivative value of input data.

### Derivative Block (LD)

#### Connection

The Derivative Block (LD) is a function block that differentiates input data. Here is a function block diagram of the Derivative Block (LD).



D021201E.EPS

Figure Function Block Diagram of Derivative Block (LD)

The following table shows the connection types and connection destinations of the I/O terminals of the Derivative Block (LD).

Table Connection Types and Connection Destinations of the I/O Terminals of Derivative Block (LD)

I/O terminal		Connection type					Connection destination		
		Data reference	Data setting	Condition testing	Status manipulation	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
IN	Calculation input	×				×	×		×
OUT	Calculation output		×			×	×		×
SUB	Auxiliary output		×			Δ	×		×

D021202E.EPS

×: Connection available  
 Blank: Connection not available  
 Δ: Connection is available only when connecting to a switch block (SW-33, SW-91) or inter-station data link block (ADL).

## D2.10 First-Order Lag Block (LAG)

The First-Order Lag Block (LAG) is used when performing filtering processing to the input signals or simulating process characteristics.

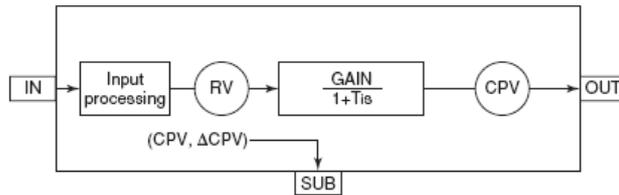
### ■ First-Order Lag Block (LAG)

▼ Connection

The First-Order Lag Block (LAG) is a function block that outputs the first-order lag of input signals.

The First-Order Lag Block (LAG) enables filtering processing of input signals as well as simulation of process characteristics.

Here is a function block diagram of the First-Order Lag Block (LAG).



D021001E.EPS

Figure Function Block Diagram of First-Order Lag Block (LAG)

The following table shows the connection types and connection destinations of the I/O terminals of the First-Order Lag Block (LAG).

Table Connection Types and Connection Destinations of the I/O Terminals of First-Order Lag Block (LAG)

I/O terminal		Connection type					Connection destination		
		Data reference	Data setting	Condition testing	Status manipulation	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
IN	Calculation input	×				×	×		×
OUT	Calculation output		×			×	×		×
SUB	Auxiliary output		×			△	×		×

D021002E.EPS

×: Connection available  
 Blank: Connection not available  
 △: Connection is available only when connecting to a switch block (SW-33, SW-91) or inter-station data link block (ADL).

## D2.33 General-Purpose Calculation Blocks (CALCU, CALCU-C)

The General-Purpose Calculation Blocks (CALCU, CALCU-C) are used when defining arbitrary calculation algorithms.

### ■ General-Purpose Calculation Blocks (CALCU, CALCU-C)

▼ Connection

The General-Purpose Calculation Block (CALCU) is a function block that executes pre-defined arbitrary calculation algorithms. Calculation algorithms are defined using the general-purpose calculation expression description language.

The Calculation Block with String I/O (CALCU-C) has the same function as the General-Purpose Calculation Block (CALCU), but the former has I/O terminals that can handle string data and a part of the I/O data is used only for string data.

Here is a function block diagram of the General-Purpose Calculation Blocks (CALCU, CALCU-C).

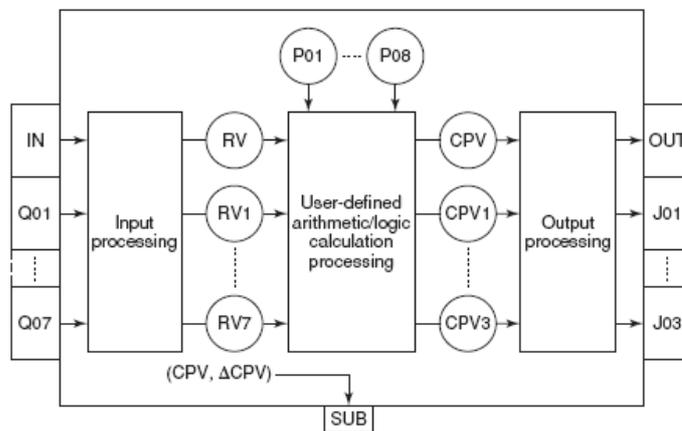


Figure Function Block Diagram of General-Purpose Calculation Blocks (CALCU, CALCU-C) D023301E.EPS

## D3.2 Sequence Table Block (ST16, ST16E)

Sequence Table Blocks (ST16, ST16E) controls the monitoring of processing and the phase step sequences by connecting with other function blocks, process I/O, and software I/O.

### ■ Sequence Table Block (ST16, ST16E)

Sequence Table Block (ST16, ST16E) is a decision table type function block that describes the relationship between input signal and output signal in a Y/N (yes/no) fashion. By making sequence connection with other function blocks, they control the monitoring of processing and phase step sequences. Sequence Table Blocks include the basic ST16, and ST16E that is only used for rule extension.

The figure below shows the function block diagram of Sequence Table Blocks (ST16, ST16E).

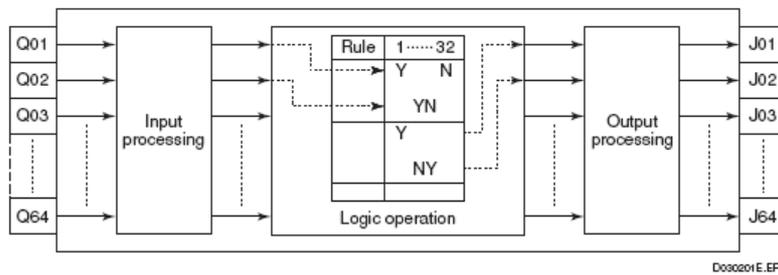


Figure Function Block Diagram of Sequence Table Block (ST16, ST16E)

The table below lists connection methods and destinations for Sequence Table Blocks (ST16, ST16E) I/O terminals.

Table Connection Methods and Destinations for Sequence Table Block (ST16, ST16E) I/O Terminals

I/O terminal	Connection type					Connection destination		
	Data reference	Data setting	Condition testing	Status manipulation	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
Q01 to Q56			×			×	×	×
J01 to J56				×		×	×	×

×: Connection available  
Blank: Connection not available

I/O connection is set by describing connection information and data in the input connection information setting area, condition specification setting area, output connection information setting area, and operation specification setting area of the sequence table displayed in the sequence table edit window of the Function Block Detail Builder.

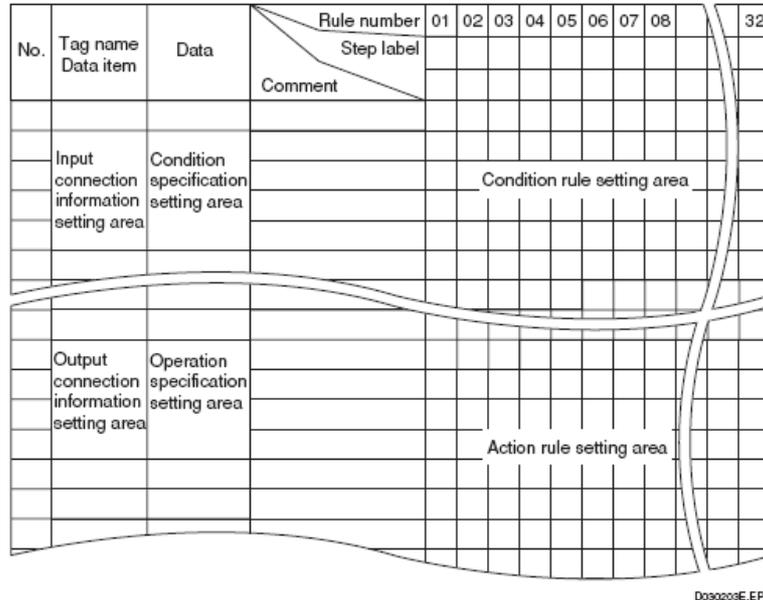


Figure Conceptual Diagram of Sequence Table

D030203E.EPS

Two types of blocks are available in the Sequence Table Block (ST16, ST16E).

- ST16: Sequence Table Block
- ST16E: Rule Extension Block

● Sequence Table Block (ST16)

The Sequence Table Block (ST16) has a sequence control function that handles a total of 64 I/O signals, 32 rules. It can also change distribution of the 64 I/O signals and output signals in the 8-signal unit. The total number of I/O signals is fixed to 64. Thus, a sequence table with only eight inputs and eight outputs cannot be created.

● Rule Extension Block (ST16E)

This function block is used for rule extensions of the Sequence Table Block (ST16). It connects to an extending Sequence Table Block (ST16) as an extended sequence table to form a sequence table group.

Because the Rule Extension Block (ST16E) is managed by the Sequence Table Block (ST16) that is an extending sequence table, it cannot be activated independently.

The Rule Extension Block (ST16E) only allows connection to a step-type extending Sequence Table Block (ST16) on which step labels is described. Nonstep-type Sequence Table Blocks (ST16) cannot be connected.

## D3.5 Timer Block (TM)

The Timer Block (TM) is used to measure time in the unit of seconds or minutes.

### ■ Timer Block (TM)

#### ▼ Connection

The Timer Block (TM) is a function block which measures time in the unit of seconds or minutes. In addition to the basic elapsed time measuring function, the block includes the preset timer function which notifies the time-up after a specified amount of time has elapsed, the function which performs the periodic action, and the function which manipulates the status based on the action signals specified in the output terminals.

The figure below is a function block diagram of the Timer Block (TM).

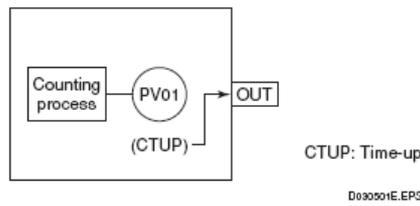


Figure Function Block Diagram of the Timer Block (TM)

The table below lists the connection methods and connection destinations of the I/O terminals of the Timer Block (TM).

Table Connection Methods and Connection Destinations of the I/O Terminals of the Timer Block (TM)

I/O terminal		Connection type					Connection destination		
		Data reference	Data setting	Condition testing	Status manipulation	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
OUT	Output terminal				×		×	×	×

D030502E.EPS

×: Connection available  
Blank: Connection not available

Operations such as the timer start or stop can be performed from the sequence control block, calculation block, and operation and monitoring functions. The block status which indicates an operating status can also be referenced from other function blocks.

Status manipulation is the only connection method from the OUT terminal of the Timer Block (TM). Thus, the Timer Block (TM) manipulates the status according to the action signals specified in the OUT terminals. The logical value of the Timer Block (TM) becomes true when the preset timer function is in time-up status (block status: CTUP).

The figure below shows an example of connection between the Timer Block (TM) and other sequence control block.

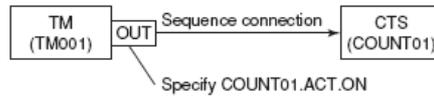


Figure Connection Example of Timer Block (TM) and Other Sequence Control Block

Every time the Timer Block (TM) with the tag name TM001 expires, the Software Counter Block (CTS) with the tag name COUNT01 is increased by one count.

## ■ Process Timing

The process timing of Timer block is only based on periodical start period. The periodic start period is based on high-speed scan period, medium-speed scan period (\*1) and basic scan period.

\*1:   Medium-speed scan period is supported in KFCS2, KFCS, FFCS, LFCS2 and LFCS only.

## ■ Set Parameter

### ▼ Timer Property

The following describes the set parameters of the Timer Block (TM).

- Preset time setpoint value (PH): 0 to 100000 (second or minute)
- Pre-alarm setpoint value (DL): PL to PH

The PL is the low-limit value (fixed at 0) of the timer elapsed time (PV).

Use the Function Block Detail Builder to set the unit for the preset time setpoint.

- Timer Property: Select from "Second timer" or "Minute timer."  
Default is "Second timer."

## D2.40 One-Batch Data Set Block (BDSET-1L)

The One-Batch Data Set Block (BDSET-1L) is used to set numeric batch set data for a single batch in a group or by selecting items.

### ■ One-Batch Data Set Block (BDSET-1L)

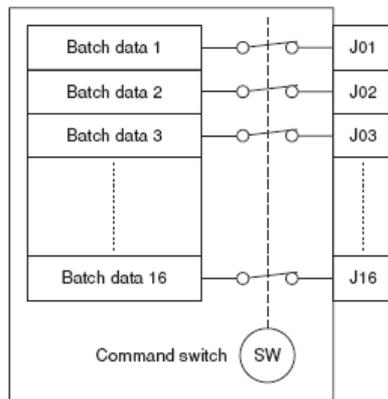
#### ▼ Connection

The One-Batch Data Set Block (BDSET-1L) is a function block that selects and outputs arbitrary numeric batch set data using a command switch (SW).

By using the command switch (SW), various setpoint values and control parameters for the feedback control loop in the batch control loop, as well as setpoint values of the timer and counter used for sequence control can be set.

In the One-Batch Data Set Block (BDSET-1L), the batch data including numeric data only can be stored up to 16 batch data.

Here is a function block diagram of the One-Batch Data Set Block (BDSET-1L).



D024101E.EPS

Figure Function Block Diagram of One-Batch Data Set Block (BDSET-1L)

The following table shows the connection types and connection destinations of the One-Batch Data Set Block (BDSET-1L).

Table Connection Types and Connection Destinations of the I/O Terminals of One-Batch Data Set Block (BDSET-1L)

I/O terminal		Connection type					Connection destination		
		Data reference	Data setting	Condition testing	Status manipulation	Terminal connection	Process I/O	Software I/O	Function block
J01 to J16	Calculation output		×			△		×	×

D024102E.EPS

×: Connection available

Blank: Connection not available

△: Connection is available only when connecting to a switch block (SW-33, SW-91) or inter-station data link block (ADL).



**ANEXO B**



## ANEXO B – SISTEMA DE TRANSMISSÃO WIRELESS

Nas próximas páginas encontram-se as folhas de dados dos elementos que constituem o sistema de transmissão sem-fio (wireless).

**Product Data Sheet**  
00813-0100-4420, Rev BA  
March 2008

1420 Wireless Gateway

### 1420 Wireless Gateway

- *Highest level of wireless security in the industry*
- *>99% data reliability*
- *No site survey required*
- *Seamless and flexible host integration*
- *Integrated web server for access to field device and process data*
- *Easy network expansion up to 100 devices*
- *Trending with local historian*



#### Contents

Smart Wireless Solutions .....	page 2
Specifications .....	page 5
Product Certifications .....	page 6
Dimensional Drawings .....	page 8
Ordering Information .....	page 10
Configuration Data Sheet .....	page 11

**Product Data Sheet**  
00813-0100-4420, Rev BA  
March 2008

## 1420 Wireless Gateway

### Wireless Overview

#### Devices

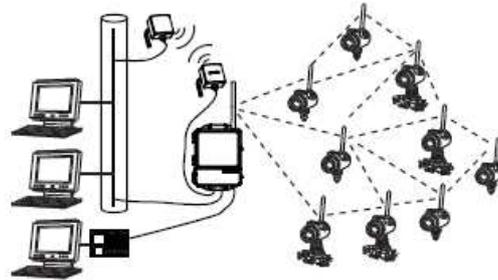
The devices that are integrated into Smart Wireless solutions are the same high quality, reliable and proven instruments that are in use today. These devices have been equipped with a wireless output that simply takes the measurement and transmits the digital HART data wirelessly.

#### Gateway

The 1420 Wireless Gateway enables the most robust security available, easy host integration with no additional software and continuously is optimizing network performance to maximize data reliability and battery life of the wireless devices.

#### Seamless Integration

Smart Wireless devices from Emerson Process Management provide measurement data and diagnostics data back to any type of information system including Serial Modbus, Modbus TCP, OPC, legacy systems and data historians.



### INFORMATION MANAGEMENT

#### Trending with Local Historian

The 1420 Wireless Gateway enables trending capabilities both in the web server and in the host system. Multiple trends may be collected in the web server, with each trend able to collect and display data from a single measurement point, or a group of points. Trends may also be exported in Excel, CSV or XML formats.

#### OPC Interface

The 1420 Wireless Gateway supports communication with host applications using OPC. Any standard output or parameter can be made available to the OPC client application.

#### Modbus Interface

The 1420 Wireless Gateway can communicate with the host system using the Modbus protocol. Any standard measurement, status, or other parameter can be read by any Modbus host system. Register number assignments are completely configurable, allowing the 1420 registers to match the requirements of the Modbus host application. The Modbus RS485 serial interface supports data rates from 9600 bps to 57600 bps. Modbus TCP/IP integration is available using the Ethernet interface.

#### Webserver

Configuration of the 1420 Wireless Gateway is accomplished using any PC with a standard web browser and secure Ethernet connection, eliminating the need for special software. User configurable monitoring pages allow measured values to be grouped and easily viewed with the web interface. Web pages can be viewed either over a dedicated network or connected to the user's Intranet. Username and Password security is provided to prevent unauthorized access to the data.

#### Asset Management

The 1420 Wireless Gateway extends all the capabilities of AMS Suite to field devices. Comprehensive asset management capabilities such as device configuration, comparing configurations, audit trail, calibration, alerts and more are now available when using AMS Suite with the 1420. When used with AMS Asset Portal, AMS Suite can provide a means to make critical device data from the 1420 available over an entire enterprise using a standard web browser over a secure Ethernet connection.

User configurable alerts have also been added to the wireless output allowing users to add value to monitoring points. These alerts can be set to flag maintenance notifications, environmental emissions, use of safety showers, tank levels - the applications are unlimited.

**Product Data Sheet**  
00813-0100-4420, Rev BA  
March 2008

## 1420 Wireless Gateway

### Specifications

#### Functional Specifications

##### Power Input Options

24 V dc  
500 milliamps required to power the 1420 Wireless Gateway module.

##### Environmental

Operating Temperature Range:  
-40 to 140 °F (-40 to 60 °C)  
Operating Humidity Range:  
0-95% relative humidity

##### Lightning and Surge Protection

Meets the requirements of EN61000-4-5.

#### Physical Specifications

##### Weight

10 lb (4.54 kg)

##### Material of Construction

**Housing**  
Low-copper aluminum, NEMA 4X  
**Pollution Degree 2**  
**Paint**  
Polyurethane  
**Cover Gasket**  
Silicone Rubber  
**Antenna**  
PBT/PC integrated omnidirectional antenna

##### Certifications

Class I Division 2 (U.S.)  
Equivalent Worldwide

#### Communication Specifications

##### RS485

2-wire communication link for Modbus multidrop connections  
Baud rate: 57600, 38400, 19200, or 9600  
Protocol: Modbus RTU  
Wiring: Single twisted shielded pair, 18 AWG. Wiring distance is approximately 5,000 ft. (1,524 m)

##### Ethernet

10baseT/ 100base-TX Ethernet communication port,  
Supports Modbus TCP/IP and OPC with 32 bit floating point values. Scaled integers are supported with Modbus TCP/IP.  
Modbus registers and OPC tags may be assigned to measurement inputs from self-organizing network.  
Assignment of tags include measurement values, status, timestamp, alarm, and battery voltage of self-organizing transmitters.  
The configuration of the tags and monitoring is performed using web pages generated by the 1420 Wireless Gateway.  
AMS management of self-organizing network transmitters.

#### Self-Organizing Network Specifications

##### Network Protocol and Synchronization

Wireless enabled HART® devices. Capable of regular PV transmission, two way HART® configuration and diagnostics, and AMS management.

##### Network Size/ Transmit Rate

100 Wireless enabled HART® devices/ max transmit rate 60 s.  
50 Wireless enabled HART® devices/ max transmit rate 15 s.

##### Network Latency

100 Wireless enabled HART® devices: 10 s.  
50 Wireless enabled HART® devices: 5 s.

##### Data Reliability

>99%

##### Antenna

Integrated Omnidirectional Antenna  
Optional remote mount omnidirectional antenna

##### Radio Frequencies

902-928 MHz FHSS  
2.4-2.5 GHz DSSS

#### System Security Specifications

##### Ethernet

SSL-enabled TCP/IP

##### 1420 Wireless Gateway

Role-based Access Controlled  
Unused Ethernet Ports are Closed

##### Self-Organizing Network

Encrypted Wireless enabled HART® with rotating keys and user controlled join keys

##### Applications

Monitoring solution for automated operator route, redundant measurements, and other non-critical applications.  
Not for mission critical safety or control applications.

##### Remote Antenna Specifications<sup>(1)</sup>

6 dB gain antenna, [length 11.5 in. (300 mm)] N type connector, for use with up to 50 ft. (15.2 m) of LMR-400 coaxial cable.

##### Lightening Protection

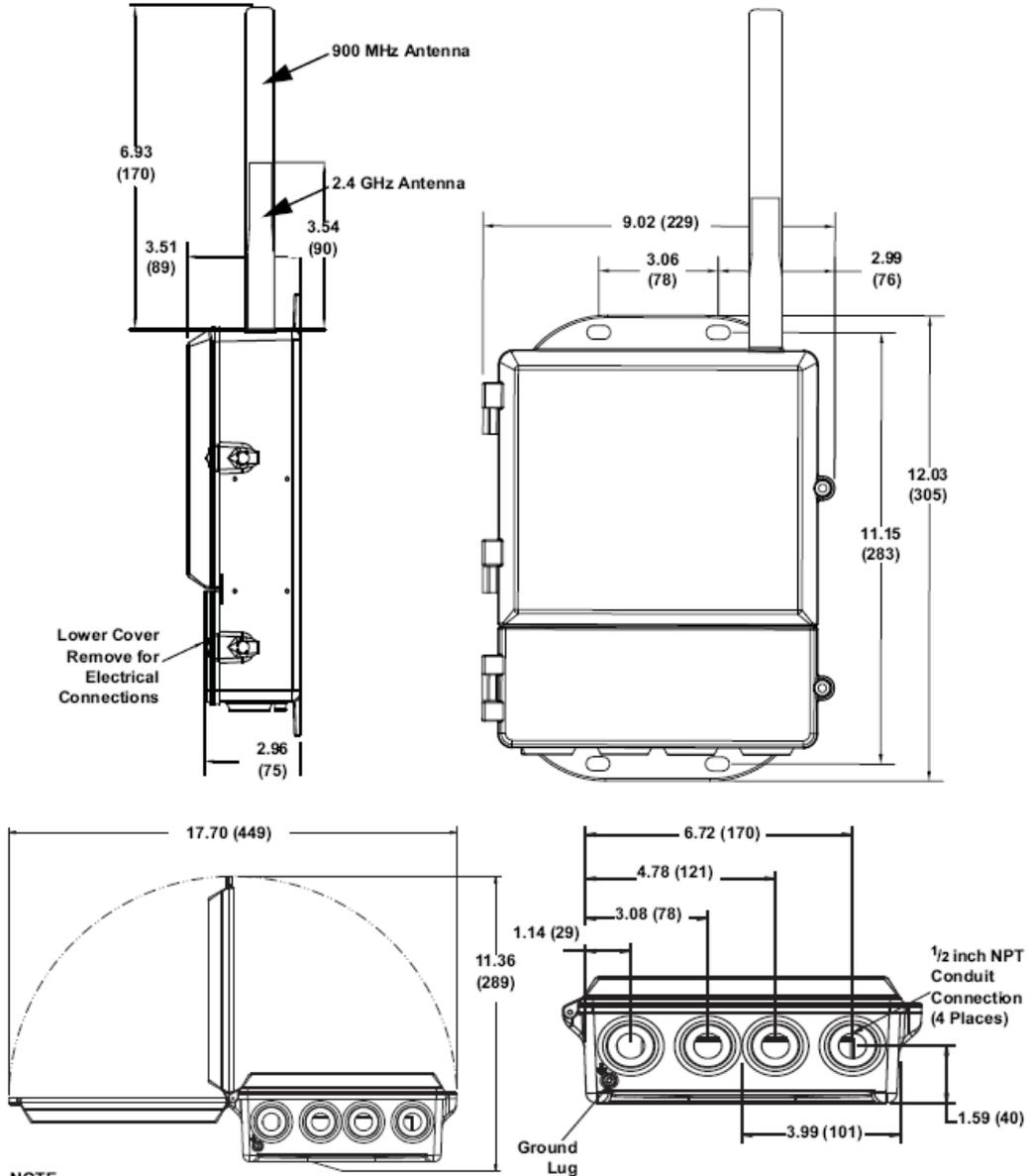
50 Ohm Gastube type, bulkhead mount, weatherized, 0.5 dB insertion loss.

(1) For remote antenna applications, the WL1 through WL4 options are required to maintain all applicable certifications, approvals, and network performance specifications. Increasing antenna gain or remote cable length may result in loss of certification and/or network performance.

**1420 Wireless Gateway**

**Dimensional Drawings**

FIGURE 2. 1420 Wireless Gateway



**NOTE**  
 Dimensions are in inches (millimeters).

Reference Manual  
00809-0100-4848, Rev AA  
July 2009

---

## Rosemount 848T Wireless Temperature Transmitter



CE

**WirelessHART**  
Expanding the Possibilities

**ROSEMOUNT**

[www.rosemount.com](http://www.rosemount.com)

  
**EMERSON**  
Process Management

Reference Manual  
00809-0100-4848, Rev AA  
July 2009

Rosemount 848T Wireless

## Appendix A Specifications and Reference Data

---

Specifications .....	page A-1
Dimensional Drawings .....	page A-5
Ordering Information .....	page A-6

---

### SPECIFICATIONS

#### Functional Specifications

##### Input

Supports Thermocouple, RTD, millivolt, ohm, and milliamp input types. See Accuracy on page A-3 for sensor options.

##### Output

WirelessHART™, linear with temperature or input.

##### Humidity Limits

0 – 99% non-condensing relative humidity.

##### Transmit Rate

User selectable, 8 sec. to 60 min.

##### Accuracy

(PT 100 @ reference conditions: 20 °C)  
±0.30 °C (±0.54 °F)

#### Physical Specifications

##### Electrical Connections/Power Module

- Replaceable, non-rechargeable, Intrinsically Safe Lithium-Thionyl Chloride power module with polybutadine terephthalate (PBT) enclosure.
- Six year life at reference conditions.<sup>(1)</sup>
- 5-Screw Terminals for sensor connection.

##### Field Communicator Connections

Clips permanently fixed to terminal block

##### Materials of Construction

###### Housing

- Low-copper aluminum

###### Paint

- Polyurethane

<sup>(1)</sup> Reference conditions are 70° F (21° C), transmit rate of once per minute, and routing data for three additional network devices.

**ROSEMOUNT**

www.rosemount.com

  
**EMERSON**  
Process Management

## Rosemount 848T Wireless

### Performance Specifications

#### Cover O-ring

- Silicon

#### Terminal Block and Power Module

- PBT

#### Antenna

- PBT/Polycarbonate (PC) integrated omnidirectional antenna

#### Mounting

Transmitters may be panel mounted or mounted to a 2-in. pipe stand using optional mounting brackets. See "Dimensional Drawings" on page A-5.

#### Weight

848T Wireless - 4.75 lbs. (2.15 kg)

#### Enclosure Ratings (848T Wireless)

Housing option codes HA1 or HA2 are Type 4X and IP66 rated.

#### EMC (ElectroMagnetic Compatibility)

Meets all relevant requirements of EN 61326.

#### Transmitter Stability

±0.15% of output reading or 0.15 °C (0.27 °F), whichever is greater, for 2 years for RTDs.

±0.15% of output reading or 0.15 °C (0.27 °F), whichever is greater, for 1 year for thermocouples.

#### Self Calibration

The analog-to-digital measurement circuitry automatically self-calibrates for each temperature update by comparing the dynamic measurement to extremely stable and accurate internal reference elements.

#### Vibration Effect

Minimal effect when tested per the requirements of IEC60770-1: High Vibration Level - field or pipeline (10-60 Hz 0.21 mm displacement peak amplitude/60-2000 Hz 3g).

## Accuracy

TABLE 1. Input Options/Accuracy

Sensor Option	Sensor Reference	Input Ranges		Accuracy Over Range(s)	
		°C	°F	°C	°F
<b>2-, 3-, and 4-Wire RTDs</b>					
Pt50 ( $\alpha = 0.003910$ )	GOST 6651-94	-200 to 550	-328 to 990	$\pm 0.57$	$\pm 1.03$
Pt 100 ( $\alpha = 0.00391$ )	GOST 6651-94	-200 to 550	-328 to 990	$\pm 0.28$	$\pm 0.50$
Pt 100 ( $\alpha = 0.00385$ )	IEC 751; $\alpha = 0.00385, 1995$	-200 to 850	-328 to 1562	$\pm 0.30$	$\pm 0.54$
Pt 100 ( $\alpha = 0.003916$ )	JIS 1604, 1981	-200 to 645	-328 to 1193	$\pm 0.30$	$\pm 0.54$
Pt 200 ( $\alpha = 0.00385$ )	IEC 751; $\alpha = 0.00385, 1995$	-200 to 850	-328 to 1562	$\pm 0.54$	$\pm 0.98$
PT 200 ( $\alpha = 0.003916$ )	JIS 1604, 1981 ( $\alpha = 0.003916$ )	-200 to 645	-328 to 1193	$\pm 0.54$	$\pm 1.03$
Pt 500 ( $\alpha = 0.00385$ )	IEC 751; $\alpha = 0.00385, 1995$	-200 to 850	-328 to 1562	$\pm 0.38$	$\pm 0.68$
Pt 1000 ( $\alpha = 0.00385$ )	IEC 751; $\alpha = 0.00385, 1995$	-200 to 300	-328 to 572	$\pm 0.40$	$\pm 0.72$
Ni 120	Edison Curve No. 7	-70 to 300	-94 to 572	$\pm 0.30$	$\pm 0.54$
Cu 10	Edison Copper Winding No. 15	-50 to 250	-58 to 482	$\pm 3.20$	$\pm 5.76$
Cu 100 (a=428)	GOST 6651-94	-185 to 200	-365 to 392	$\pm 0.48$	$\pm 0.86$
Cu 50 (a=428)	GOST 6651-94	-185 to 200	-365 to 392	$\pm 0.96$	$\pm 1.73$
Cu 100 (a=426)	GOST 6651-94	-50 to 200	-122 to 392	$\pm 0.48$	$\pm 0.86$
Cu 50 (a=426)	GOST 6651-94	-50 to 200	-122 to 392	$\pm 0.96$	$\pm 1.73$
<b>Thermocouples—Cold Junction Adds + 0.5 °C to Listed Accuracy</b>					
NIST Type B (Accuracy varies according to input range)	NIST Monograph 175	100 to 300	212 to 572	$\pm 6.00$	$\pm 10.80$
NIST Type E	NIST Monograph 175	301 to 1820	573 to 3308	$\pm 1.54$	$\pm 2.78$
NIST Type J	NIST Monograph 175	-200 to 1000	-328 to 1832	$\pm 0.40$	$\pm 0.72$
NIST Type K	NIST Monograph 175	-180 to 760	-292 to 1400	$\pm 0.70$	$\pm 1.26$
NIST Type K	NIST Monograph 175	-180 to 1372	-292 to 2502	$\pm 1.00$	$\pm 1.80$
NIST Type N	NIST Monograph 175	-200 to 1300	-328 to 2372	$\pm 1.00$	$\pm 1.80$
NIST Type R	NIST Monograph 175	0 to 1768	32 to 3214	$\pm 1.50$	$\pm 2.70$
NIST Type S	NIST Monograph 175	0 to 1768	32 to 3214	$\pm 1.40$	$\pm 2.52$
NIST Type T	NIST Monograph 175	-200 to 400	-328 to 752	$\pm 0.70$	$\pm 1.26$
DIN L	DIN 43710	-200 to 900	-328 to 1652	$\pm 0.70$	$\pm 1.26$
DIN U	DIN 43710	-200 to 600	-328 to 1112	$\pm 0.70$	$\pm 1.26$
w5Re/W26Re	ASTME 988-96	0 to 2000	32 to 3632	$\pm 1.60$	$\pm 2.88$
Type L	GOST R.8.585-2001	-200 to 800	-328 to 1472	$\pm 0.71$	$\pm 1.28$
Body Temperature of Transmitter		-50 to 85	-58 to 185	$\pm 3.50$	$\pm 6.30$
<b>Input Units</b>					
Ohm Input		0 to 2000 ohms		$\pm 0.90$ ohms	
Millivolt Input		-10 to 100 mV		$\pm 0.05$ mV	
4–20 mA (Rosemount) <sup>(1)</sup>		4–20 mA		$\pm 0.01$ mA	
4–20 mA (NAMUR) <sup>1</sup>		4–20 mA		$\pm 0.01$ mA	

(1) Requires the S002 option code.

## Rosemount 848T Wireless

### Ambient Temperature Effect

Transmitters may be installed in locations where the ambient temperature is between -40 and 85 °C (-40 and 185 °F).

TABLE 2. Ambient Temperature Effects

NIST Type	Accuracy per 1.0 °C (1.8 °F) Change in Ambient Temperature <sup>(1)</sup>	Temperature Range (°C)
<b>RTD</b>		
Pt 50 ( $\alpha = 0.003910$ )	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
Pt 100 ( $\alpha = 0.00391$ )	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
Pt 100 ( $\alpha = 0.00385$ )	• 0.003 °C (0.0054 °F)	NA
Pt 100 ( $\alpha = 0.003916$ )	• 0.003 °C (0.0054 °F)	NA
Pt 200 ( $\alpha = 0.00385$ )	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
PT 200 ( $\alpha = 0.003916$ )	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
Cu 10	• 0.03 °C (0.054 °F)	NA
Pt 500	• 0.003 °C (0.0054 °F)	NA
Pt 1000	• 0.003 °C (0.0054 °F)	NA
Cu 100 (a=428)	• 0.002 °C (0.0036 °F)	NA
Cu 50 (a=428)	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
Cu 100 (a=426)	• 0.002 °C (0.0036 °F)	NA
Cu 50 (a=426)	• 0.004 °C (0.0072 °F)	NA
Ni 120	• 0.003 °C (0.0054 °F)	NA
<b>Thermocouple (R = the value of the reading)</b>		NA
Type B	• 0.014 °C • 0.032 °C - (0.0025% of (R - 300)) • 0.054 °C - (0.011% of (R - 100))	• R ≥ 1000 • 300 ≤ R < 1000 • 100 ≤ R < 300
Type E	• 0.005 °C + (0.00043% of R)	• All
Type J, Din Type L	• 0.0054 °C + (0.00029% of R) • 0.0054 °C + (0.0025% of  R )	• R ≥ 0 • R < 0
Type K	• 0.0061 °C + (0.00054% of R) • 0.0061 °C + (0.0025% of  R )	• R ≥ 0 • R < 0
Type N	• 0.0068 °C + (0.00036% of R)	• All
Type R, Type S	• 0.016 °C • 0.023 °C - (0.0036% of R)	• R ≥ 200 • R < 200
Type T, DIN Type U	• 0.0064 °C • 0.0064 °C - (0.0043% of  R )	• R ≥ 0 • R < 0
GOST Type L	• 0.007 °C • 0.007 °C + (0.003% of  R )	• R ≥ 0 • R < 0
<b>input Units</b>		
Ohm input	• 0.0084 ohms	NA
Millivolt Input	• 0.0005 mV	NA
4-20 mA (Rosemount)	• 0.0001 mA	NA
4-20 mA (NAMUR)	• 0.0001 mA	NA

(1) Change in ambient is in reference to the calibration temperature of the transmitter (20 °C (68 °F) typical from the factory).

### Ambient Temperature Notes

#### Examples:

- When using a Pt 100 ( $\alpha = 0.00385$ ) sensor input at 40 °C ambient temperature, temperature effects would be:  
Ambient Temperature Effects:  $0.003 \text{ °C} \times (40 - 20) = 0.06 \text{ °C}$
- Worst Case Error: Sensor Accuracy + Ambient Temperature Effects =  $0.30 \text{ °C} + 0.06 \text{ °C} = 0.36 \text{ °C}$
- Total Probable Error  $\sqrt{0.30^2 + 0.06^2} = 0.305 \text{ °C}$

**DIMENSIONAL DRAWINGS**

