



Universidade Federal de Ouro Preto - UFOP - Escola de Minas - Colegiado do curso de Engenharia de Controle e Automação - CECAU



Arthur Oliveira Viana

Modelagem e previsão de nível de líquidos em cadinhos de altos-fornos

Monografia de Graduação em Engenharia de Controle e Automação

Ouro Preto, 2017

Arthur Oliveira Viana

**Modelagem e previsão de nível de líquidos em cadinhos de
altos-fornos**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Agnaldo José da Rocha Reis, Dr.

Ouro Preto, 2017

V614m Viana, Arthur Oliveira.
Modelagem e previsão de nível de líquidos em cadinhos de altos-fornos
[manuscrito] / Arthur Oliveira Viana. - 2017.

58f.: il.: color; grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis.

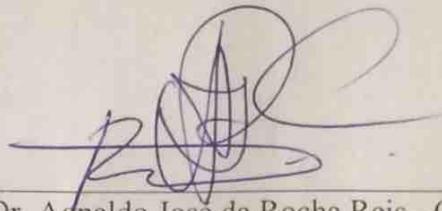
Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Altos-fornos. 2. Fornos metalúrgicos. 3. Modelagem de processos. I. Reis, Agnaldo José da Rocha. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

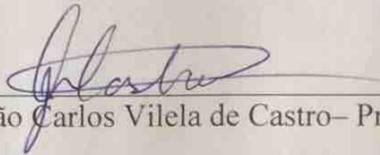
CDU: 681.5

Catálogo: ficha@sisbin.ufop.br

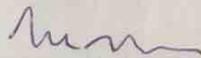
Monografia defendida e aprovada, em 04 de setembro de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Orientador



Prof. M. Sc. João Carlos Vilela de Castro - Professor Convidado



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Professor Convidado

Agradecimentos

A esta universidade, seu corpo docente, direção e administração, pela oportunidade de aprendizado e crescimento.

Ao meu orientador Agnaldo, pelo suporte e empenho no pouco tempo que lhe coube, pelas suas correções e incentivos.

Aos meus pais Maria de Fátima e Rodrigo, meu irmão Gabriel e a toda a minha família que, com muito carinho e apoio, não mediram esforços para que eu chegasse até esta etapa da minha vida.

A minha namorada Isadora dedicada à conclusão deste trabalho, pelo incentivo, apoio e carinho constantes.

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, o meu muito obrigado.

“Hoje é sempre o dia certo de fazer as coisas certas, de maneira certa. Amanhã será tarde.” (Martin Luther King)

Resumo

Descreve-se no presente trabalho a modelagem de um sistema de previsão do nível de líquidos em um cadinho de alto-forno, baseado na monitoração da força eletromotriz (FEM) gerada na carcaça desse. Técnicas de filtragem digital, estudos sobre a correlação e análise estatística, modelagem matemática por séries temporais e processamento digital de sinais são algumas das ferramentas utilizadas neste trabalho. Também são apresentados o estudo da influência das variáveis de processo no sinal, o tratamento digital e a modelagem do mesmo através da utilização de um modelo auto-regressivo, em que, como resultado, foi obtida a previsão da FEM em 30 (trinta) minutos à frente do tempo. A utilização do sistema permite antecipar atuações no controle operacional e evitar grandes variações no nível térmico do alto-forno, proporcionando maior segurança e estabilidade operacional.

Palavras-chaves: alto-forno, previsão, nível de líquidos, força eletromotriz (FEM), modelo auto-regressivo.

Abstract

It is described in the present work the modeling of a prediction system of liquid level in a blast furnace's hearth, based on the monitoring of the electromotive force (EMF) generated in its walls. Digital filtering techniques, correlation and statistical analysis studies, time series mathematical modeling and digital signal processing are some of the tools used in this work. It is also presented the study of the influence of process variables on the signal, the treatment of the signal in order to make it totally reliable and stationary, and its modeling through the use of an autoregressive model, where, as a result, the FEM forecast was obtained in 30 (thirty) minutes ahead of time. The use of the system allows to anticipate actuations in the operational control and to avoid great variations in the thermal level of the blast furnace, providing greater safety and operational stability.

Key-words: blast furnace, electromotive force, liquid level, prediction, auto-regressive model.

Lista de ilustrações

Figura 1	Principais partes do alto-forno	16
Figura 2	Fluxo de materiais dentro do alto-forno	17
Figura 3	Matérias-primas e produtos do alto-forno	18
Figura 4	Zonas da região interna do alto-forno	19
Figura 5	Cadinho com baixo nível de líquidos	21
Figura 6	Cadinho com alto nível de líquidos	21
Figura 7	Cadinho de um alto-forno	22
Figura 8	Separação gusa/escória	23
Figura 9	Padrão de operação para um alto-forno de 4 furos de corrida	24
Figura 10	Circuito elétrico equivalente à geração de FEM na carcaça de um alto-forno	25
Figura 11	Posição dos sensores	26
Figura 12	Comportamento da FEM no interior do alto-forno	27
Figura 13	Representação esquemática do modelo ARX	34
Figura 14	Representação esquemática do modelo ARMAX	35
Figura 15	Relação entre sinal no domínio do tempo e da frequência	38
Figura 16	Sistema para filtrar um sinal de tempo contínuo	39
Figura 17	Filtro digital Rejeita-Faixa	40
Figura 18	Gráfico da Série temporal de FEM - 8 dias	42
Figura 19	Gráfico da Série temporal de FEM e Temperatura de Gusa	43
Figura 20	Gráfico da Série temporal de FEM e Pressão de Sopros	43
Figura 21	Gráfico da Série temporal de FEM e Carga Térmica	44
Figura 22	Gráfico de dispersão - Correlação entre Carga Térmica vs FEM	44
Figura 23	Gráfico de dispersão - Correlação entre Pressão de Sopros vs FEM	45
Figura 24	Gráfico de dispersão - Correlação entre Temperatura de Gusa vs FEM	45
Figura 25	Gráfico ARX - FEM Medida e previsão para 3 passos à frente	47
Figura 26	Gráfico da Série temporal de FEM - 15 dias	49
Figura 27	Gráfico da Série temporal de FEM Medida e FEM sem médias	49
Figura 28	Gráfico do Periodograma de FEM - Domínio da frequência	50
Figura 29	Gráfico da Série Temporal de FEM - Domínio do tempo	51
Figura 30	Gráfico do Periodograma de FEM - Domínio da Frequência	51
Figura 31	Gráfico da Série Temporal de FEM - Domínio do Tempo	52
Figura 32	Gráfico AR (15) - FEM Medida e previsão para 3 passos à frente	53
Figura 33	Sistema de monitoramento do nível de líquidos	55

Lista de tabelas

Tabela 1	Grau de correlação	46
Tabela 2	Correlação entre entradas e saída	46
Tabela 3	Conversão de escala	54

Sumário

1	Introdução	12
1.1	Relevância	12
1.2	Objetivo	13
1.2.1	Geral	13
1.2.2	Específico	13
1.3	Organização e estrutura	14
2	Revisão Bibliográfica	15
2.1	Indústria siderúrgica	15
2.2	Conceitos gerais	15
2.2.1	Produção de gusa em altos-fornos à coque	15
2.2.2	Princípio de funcionamento	17
2.2.3	Estruturas internas do alto-forno	18
2.2.4	Operação do alto-forno	19
2.3	O cadinho do alto-forno	22
2.3.1	Drenagem do cadinho	22
2.3.2	Layout de operação	23
2.3.3	Operação da casa de corrida	24
2.4	O esgotamento do cadinho e a FEM	24
2.4.1	Origem da força eletromotriz gerada na carcaça do alto-forno	24
2.4.2	Equipamentos de medição	26
2.4.3	Comportamento da FEM no esgotamento	27
3	Metodologia	29
3.1	Análise da correlação	29
3.2	Modelagem e identificação de sistemas	30
3.2.1	Séries temporais	30
3.2.2	Tipos de modelos	30
3.2.3	Identificação de sistemas	31
3.2.3.1	Modelagem matemática	32
3.2.3.2	Modelo ARX	32
3.2.3.3	Modelo ARMAX	34
3.2.3.4	O estimador de mínimos quadrados	35
3.2.4	Domínio da frequência	37
3.3	Filtros digitais	39

4	Resultados	41
4.1	Dados históricos	41
4.2	Correlação das variáveis	42
4.3	Modelagem da FEM por modelo ARX	47
4.4	Filtragem do sinal	48
4.5	Modelagem e predição da FEM por séries temporais	52
5	Conclusão	56
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	56
	Referências	57

1 Introdução

1.1 Relevância

A indústria siderúrgica desempenha um papel de suma importância para a economia brasileira, podendo-se observar um crescimento expressivo deste segmento no Brasil nos últimos anos. Existe a preocupação relacionada ao constante desenvolvimento de pesquisas destinadas à produção de aços especiais e aperfeiçoamento dos processos metalúrgicos. Atualmente é reconhecida internacionalmente por sua seriedade, qualidade, competitividade e domínio tecnológico.

No processo de produção do aço, os altos-fornos se destacam por suas vantagens de estabilidade operacional e principalmente, por suas altas taxas de produção. Na siderurgia brasileira o gusa é produzido por altos-fornos à coque ou à carvão vegetal.

O escoamento de gusa e escória no interior do cadinho de um alto-forno tem importante função no processo produtivo. Uma das principais metas operacionais dos altos-fornos é aumentar sua produtividade e prolongar a vida de campanha.

O cadinho do alto-forno desempenha um papel vital na produção de ferro-gusa, sendo de especial interesse para os operadores obter conhecimento profundo sobre o nível de líquidos, bem como do estado térmico de gusa e escória no interior do alto-forno. A capacidade de medir com exatidão os níveis de escória e líquidos de ferro no cadinho, cria situações de operação mais estáveis, além de proteger o alto-forno de instabilidades operacionais.

Quando esse processo é devidamente controlado, melhores condições de segurança e reduções de custo significativas podem ser alcançadas. A operação ideal do esgotamento do cadinho para um alto-forno é o vazamento contínuo, de forma alternada, com tempos de vazamentos semelhantes para as corridas e um fluxo de escória quase contínuo. Isso exige a otimização contínua da prática na casa de corrida e dos métodos de esgotamento, por meio de instrumentação otimizada.

Dessa forma, modelos de monitoração de níveis de líquidos têm sido desenvolvidos com o objetivo de prever desvios operacionais e otimizar o processo, de modo a garantir estabilidade operacional através de uma ferramenta que visa prover melhor gerenciamento das atividades de perfuração e tamponamento dos furos-de-gusa. Estas práticas são referentes à obtenção dos produtos do alto-forno, gusa líquido e escória, que são juntamente retirados pelo furo-de-gusa durante sua abertura. Em seguida após o tempo de retirada

do material, o furo é fechado ao final do vazamento utilizando-se massa refratária. Logo, uma operação mais confiável e assertiva será alcançada trazendo, conseqüentemente, uma otimização do processo com ganhos financeiros relevantes.

O método mais avançado para determinação dos níveis de líquidos no interior do cadinho é a medição da força eletromotriz (FEM) gerada na carcaça do alto-forno, que pode ser correlacionada com o nível de líquidos no interior do cadinho, possibilitando medir, indiretamente, esta variável.

As forças eletromotrizes são produzidas devido aos processos químicos e térmicos que ocorrem no alto-forno. Estes, 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 alto-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 de líquidos no cadinho.

Para realizar a medição são utilizados 4 (quatro) pares de sensores na carcaça do alto-forno, um par 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).

1.2 Objetivo

1.2.1 Geral

Objetiva-se com este trabalho desenvolver um modelo matemático para aumentar a estabilidade operacional do processo de obtenção de ferro-gusa em altos-fornos através da implantação de um sistema para estimação do nível de líquidos com base na força eletromotriz gerada na carcaça do cadinho do alto-forno.

1.2.2 Específico

É visada a implantação do sistema com base em modelos caixa-preta (modelagem que não utiliza equações físico-químicas do processo), para que este possa ser utilizado em altos-fornos sem a necessidade de profundos conhecimentos a respeito do processo, como por exemplo, as complexas reações que ocorrem no interior do mesmo.

Etapas para desenvolvimento do sistema:

1. Analisar a correlação do sinal de FEM com os processos no interior do cadinho;
2. Desenvolver o modelo operacional de medição;

3. Analisar os resultados: comparação da real situação do nível de líquidos com a indicada pelo sistema.

1.3 Organização e estrutura

O presente trabalho está organizado na seguinte forma: o Capítulo 1 apresenta uma introdução e relevância do tema deste trabalho, assim como explicita os objetivos. o Capítulo 2 traz um panorama geral sobre o processo de produção do ferro-gusa e o fenômeno responsável pela geração da força eletromotriz na carcaça do alto-forno, além da sua relação com o processo. O Capítulo 3 apresenta uma fundamentação teórica das principais ferramentas e técnicas utilizadas neste trabalho. São elas: correlação estatística e regressão linear, modelagem e identificação de sistemas e filtragem digital. Nesse capítulo também está descrito como serão utilizadas essas técnicas e é apresentado o método proposto. Os testes realizados e os resultados encontrados estão no Capítulo 4. No Capítulo 5 encontra-se uma análise do trabalho como um todo e considerações finais, assim como sugestões para pesquisas futuras.

2 Revisão bibliográfica

2.1 Indústria siderúrgica

Siderurgia é o ramo da metalurgia que se dedica à fabricação e tratamento de aços e ferros fundidos.

A indústria brasileira possui uma vantagem competitiva quanto ao baixo custo da matéria-prima, dada sua disponibilidade e condições de exploração favoráveis. Além disso, o parque industrial e o aprendizado acumulado na área de gestão dos processos produtivos acrescentam uma vantagem à produção nacional.

2.2 Conceitos gerais

2.2.1 Produção de gusa em altos-fornos à coque

O alto-forno é um reator metalúrgico de contra corrente destinado à produção do ferro-gusa. O ferro-gusa é obtido a partir da redução de óxidos de ferro e fusão do metal em contra corrente com os gases redutores (CO e H_2). O ferro gusa é uma solução ferro-carbono, composta de 90 a 95% de ferro, 3,0 a 4,5% de carbono, elementos de liga como silício (Si) e manganês (Mn) e impurezas como fósforo (P) e enxofre (S) (ARAÚJO, 1997).

No alto-forno, o gusa é produzido no estado líquido a uma temperatura de aproximadamente 1.500°C , após este processo ele vai para a aciaria, onde passa por purificações e tratamentos para adquirir determinadas características e passar a se denominar aço. Além do gusa, são gerados no alto-forno subprodutos como escória, gás de alto-forno e pó.

A escória é obtida pela fusão e separação da ganga das matérias-primas e dos fundentes. É constituída principalmente de óxidos termodinamicamente estáveis como MgO , CaO , Al_2O_3 e SiO_2 , que somam cerca de 95% em peso na escória. O gás do alto-forno, que contém cerca de 20 a 25% de CO e 3% de H_2 pode ser usado como combustível, com um poder calorífico de 700 a 800 kcal/Nm³ (BAER, 1970).

A [Figura 1](#) mostra um desenho esquemático do alto-forno onde se destacam a estrutura e os componentes principais em que é dividido.

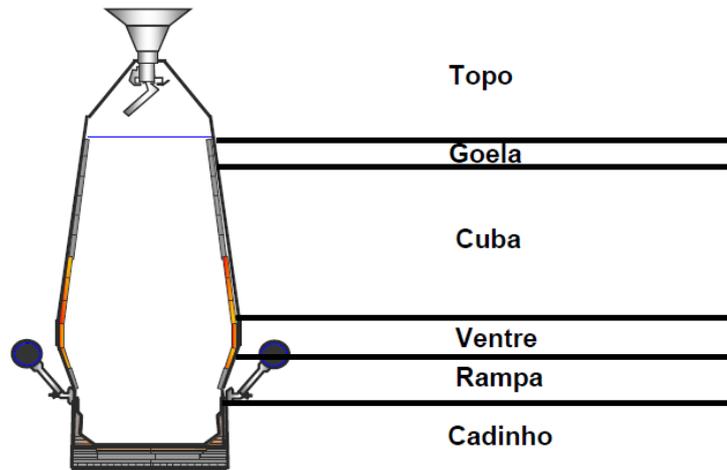


Figura 1: Principais partes do alto-forno

Fonte: [Araújo \(1997\)](#)

- Topo: é a parte superior do alto-forno, por onde a carga é carregada e por onde os gases são coletados para serem conduzidos ao sistema de limpeza de gás;
- Goela: região abaixo do topo do forno reforçada para manter os dispositivos de carregamento e distribuição da carga e receber os impactos destes.
- Cuba: possui um formato tronco-cônico, com maior diâmetro na parte inferior e compreende a maior região volumétrica do alto-forno. Nessa região ocorrem as principais reações gás/sólido de redução;
- Ventre: região acima da rampa, onde os gases se expandem e se distribuem através da zona de amolecimento e fusão;
- Rampa: região imediatamente acima das ventaneiras, onde se tem a combustão do coque e a raiz da zona de amolecimento e fusão. O formato tronco-cônico invertido, ajuda na sustentação da carga no interior do forno;
- Cadinho: região inferior do alto-forno onde o material líquido (gusa e escória) é armazenado antes de ser vazado. Tem-se a presença de líquidos, sólidos e gases, com a ocorrência de algumas reações. No cadinho, o gusa e a escória se separam por diferença de densidade.

2.2.2 Princípio de funcionamento

O ar soprado pelas ventaneiras reage com o coque e o carvão gerando o gás redutor CO e calor. Na região inferior do alto-forno, os gases em temperaturas superiores a 2.000°C irão fundir a carga metálica e a escória. Esse gás redutor em contato com as fontes de ferro promove a redução dos óxidos (SPENCE; PRITCHARD, 1997).

A Figura 2 ilustra o princípio de funcionamento do alto-forno.

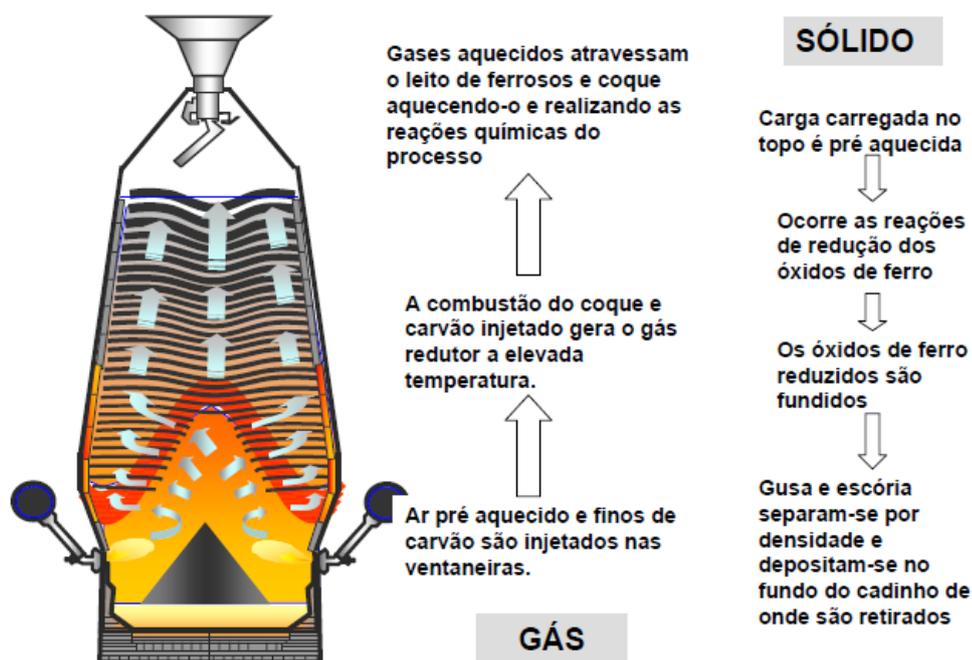


Figura 2: Fluxo de materiais dentro do alto-forno

Fonte: Araújo (1997)

O coque é o combustível e agente redutor para o processo de redução dos óxidos de ferro. Ele também age como “espaçador”, suportando a carga e criando espaços apropriados de modo a garantir um bom escoamento dos gases e dos materiais fundidos. Para que se consiga esse papel de “espaçador”, exige-se do coque baixa reatividade e alta resistência mecânica de maneira que não se degrade à medida que o mesmo desce do topo até a zona inferior do alto-forno.

O minério de ferro granulado, a pelota e o sinter são as fontes de óxidos de ferro das quais o metal (Fe) é extraído no alto-forno. Essas matérias-primas trazem também “impurezas”, principalmente Al_2O_3 , CaO, SiO_2 , MgO, que fundidas formarão a escória que se dirige ao cadinho juntamente com o gusa (RIZZO, 2005).

Na [Figura 3](#) são apresentadas as matérias-primas e produtos do alto-forno.

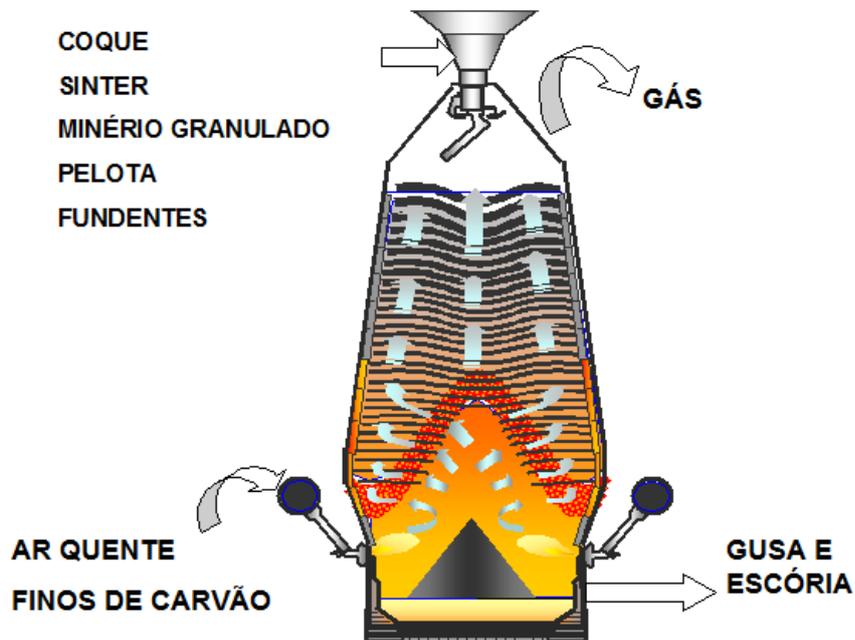


Figura 3: Matérias-primas e produtos do alto-forno

Fonte: Araújo (1997)

2.2.3 Estruturas internas do alto-forno

O alto-forno é dividido em quatro zonas distintas:

- Zona granular:

Zona onde a carga metálica (sinter, e/ou pelota e/ou minério), o termo-redutor (carvão vegetal ou coque) e os fundentes descem sólidos em contra corrente com os gases;

- Zona de amolecimento e fusão:

Região onde ocorre o amolecimento e fusão da carga metálica;

- Zona de gotejamento:

Zona onde o metal e a escória, já líquidos, escoam através de um empilhamento de coque (ou carvão vegetal) em contra corrente com os gases. A zona de gotejamento engloba o homem morto e a zona de combustão. O homem morto é a coluna de coque por onde o metal e a escória gotejam e que não alimenta a zona de combustão. Ele se estende até o cadinho, podendo ou não encostar na base do cadinho;

- Zona de combustão:

Região em frente das ventaneiras, onde ocorre a queima do C (carbono) do redutor (coque, carvão) pelo oxigênio do ar soprado. Nesta região irá formar o gás redutor (CO e H₂) a partir da umidade do ar soprado, hidrocarbonetos do carvão injetado e carbono do coque.

A [Figura 4](#) mostra a divisão do alto-forno em várias zonas.



Figura 4: Zonas da região interna do alto-forno

Fonte: Araújo (1997)

2.2.4 Operação do alto-forno

No alto-forno, instrumentos modernos para observação, controle operacional de equipamentos e supervisão da operação por computadores estão sendo utilizados. Entretanto, vários fenômenos que ocorrem no interior do alto-forno ainda não são perfeitamente explicados. Por isso, a maioria dos altos-fornos em operação ainda dependem, em muitos pontos, da experiência dos operadores. Aí reside a principal dificuldade de se operar um alto-forno (ZENG; GAO; SU, 2010).

A operação se apoia, na realidade, em vários dados como:

- Propriedades e composição do gusa e escória;
- Temperatura e composição do gás do topo;
- Pressão de sopro;
- Condição de descida da carga;
- Temperaturas nas paredes do alto-forno;
- Observação da frente da ventaneira (zona de combustão).

Esses dados são usados para avaliação, num esforço para obter-se uma operação estável. A estabilidade é um aspecto fundamental na operação do alto-forno, principalmente com a atual tendência de se ter altos-fornos cada vez maiores. E uma vez iniciada a operação do alto-forno, ela deve se manter praticamente ininterrupta por vários anos. A campanha dos altos-fornos de projetos mais antigos é de 5 a 8 anos (MOURÃO; YOKOJI; MALYNOWSKYJ, 2007).

O controle de operação pode ser dividido nos seguintes itens:

- Controle de equipamentos:

O bom funcionamento dos equipamentos auxiliares é fundamental para se garantir a estabilidade do alto-forno. Os equipamentos da área de corrida (canhões e perfuradores), do carregamento (peneiras e balanças), da distribuição de carga, de refrigeração, regeneradores e limpeza de gás, têm influência direta nos parâmetros operacionais como drenagem do cadinho, permeabilidade da carga, temperatura de sopro entre outros.

- Controle de vazamento de gusa e escória (drenagem do cadinho):

O controle do nível de líquidos no cadinho é também de fundamental importância na obtenção de uma operação estável do alto-forno. Um aumento no nível de líquidos no cadinho pode resultar na alteração do fluxo gasoso no interior do alto-forno e redução da permeabilidade na rampa (SPENCE; PRITCHARD, 1997).

A Figura 5 mostra a condição do cadinho com baixo nível de líquidos e consequentemente boa permeabilidade.

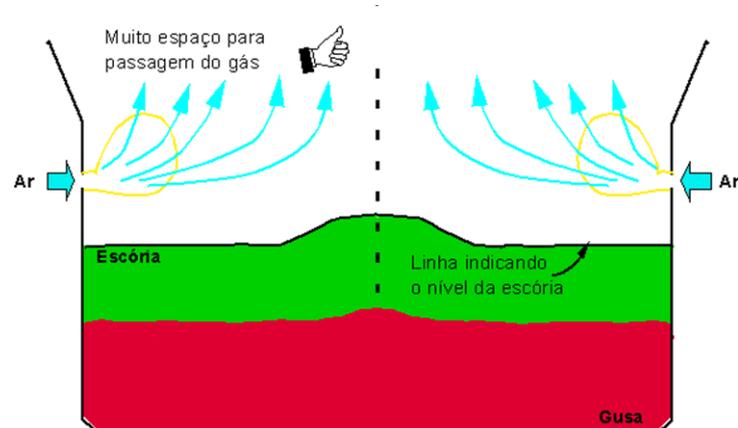


Figura 5: Cadinho com baixo nível de líquidos

Fonte: Tavares (2005)

A Figura 6 mostra a situação contrária, onde se observa alto nível de líquidos no cadinho e pouco espaço para passagem do gás.



Figura 6: Cadinho com alto nível de líquidos

Fonte: Tavares (2005)

- Controle operacional:

O controle operacional do alto-forno envolve o conhecimento das reações e formação das zonas no seu interior, de forma a se ter um maior controle para manter a estabilidade do alto-forno.

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 ($2,3 t/m^3$) do que o gusa ($7,2 t/m^3$) e flutua sobre ele.

Na [Figura 7](#) 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.

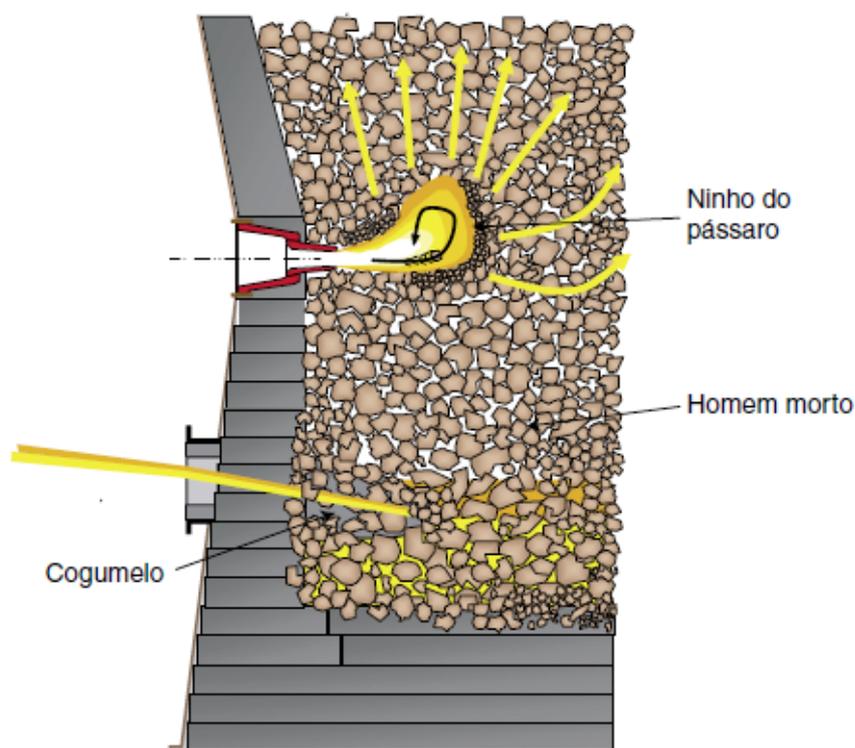


Figura 7: Cadinho de um alto-forno

Fonte: [Geerdes, Chaigneau e Kurunov \(2015\)](#)

2.3.1 Drenagem do cadinho

O alto forno é vazado de 8 a 14 vezes por dia através do furo de corrida. A duração média de um vazamento é 1,5 a 3 horas. Neste tempo, o alto-forno produz uma parte considerável do seu volume de trabalho. O tempo de residência da carga é de 5 a 6 horas. Desta forma, para um vazamento de 2 horas, aproximadamente 1/3 do conteúdo do forno é fundido em ferro e escória. O início de sopro de gás no furo-de-gusa indica um cadinho “vazio”, sendo necessário o fechamento imediato pois o ar soprado pelas ventaneiras se conectou com o furo-de-gusa ([GEERDES; CHAIGNEAU; KURUNOV, 2015](#)).

O nível dos líquidos no cadinho afeta o processo de produção do alto-forno de duas formas:

- a) 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;
- b) 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 alto-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.

2.3.2 Layout de operação

Um alto-forno moderno possui pelo menos 02 (dois) furos-de-gusa. Os altos-fornos maiores, com cadinhos com 14 metros de diâmetro, possuem geralmente 04 furos-de-gusa. O gusa é vazado no canal principal enquanto a escória escoa pelos canais secundários. O gusa e a escória são separados facilmente pela diferença de densidade. Um layout esquemático da separação de gusa e escória é mostrado na [Figura 8](#).

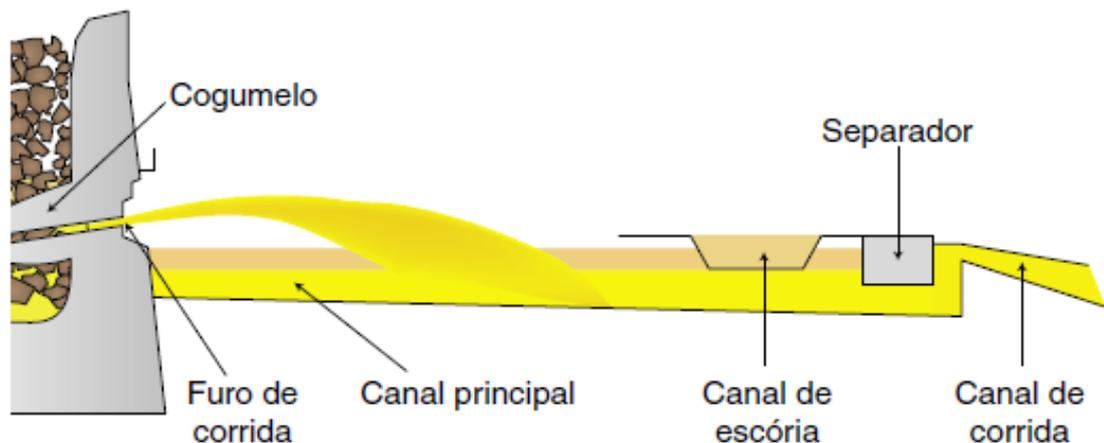


Figura 8: Separação gusa/escória

Fonte: Geerdes, Chaigneau e Kurunov (2015)

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.

2.3.3 Operação da casa de corrida

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-químicas do gusa e escória, do comprimento e diâmetro do furo de gusa e da pressão interna do alto-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 do fluxo de vazamento pode ser visto na [Figura 9](#).

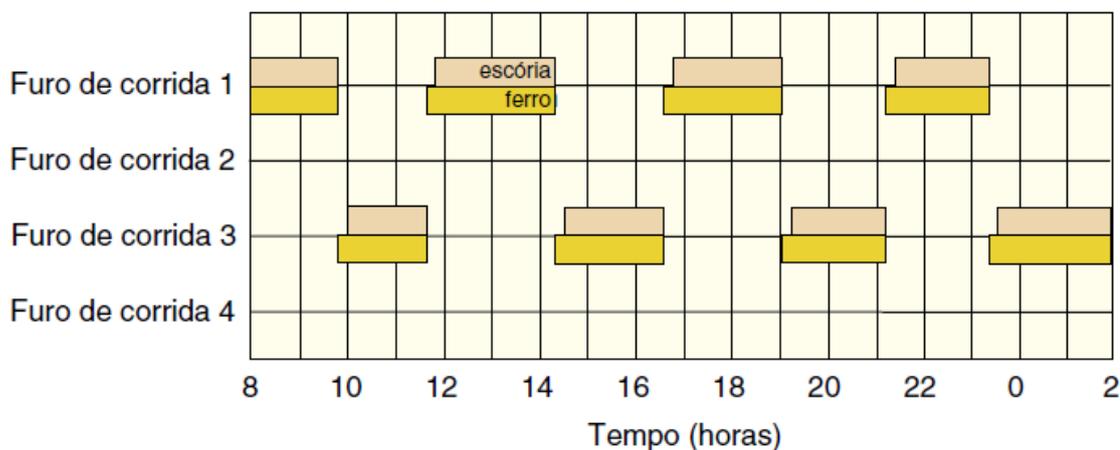


Figura 9: Padrão de operação para um alto-forno de 4 furos de corrida

Fonte: Geerdes, Chaigneau e Kurunov (2015)

2.4 O esgotamento do cadinho e a FEM

2.4.1 Origem da força eletromotriz gerada na carcaça do alto-forno

As forças eletromotrizes são produzidas devido aos processos químicos e térmicos que ocorrem no alto-forno. Estes, 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 alto-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).

Um dos sistemas de medição do nível dos líquidos em altos-fornos consiste na 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 (PETERS et al., 2001).

Para um processo estável, a corrente e, conseqüentemente, a diferença de potencial que é medida na carcaça (FEM) varia de acordo com três componentes, que são exemplificadas na Figura 10 abaixo: a resistência da camada de coque (R_{Co}), a resistência da camada de ferro-gusa (R_G) e a resistência da camada de 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. Isso 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.

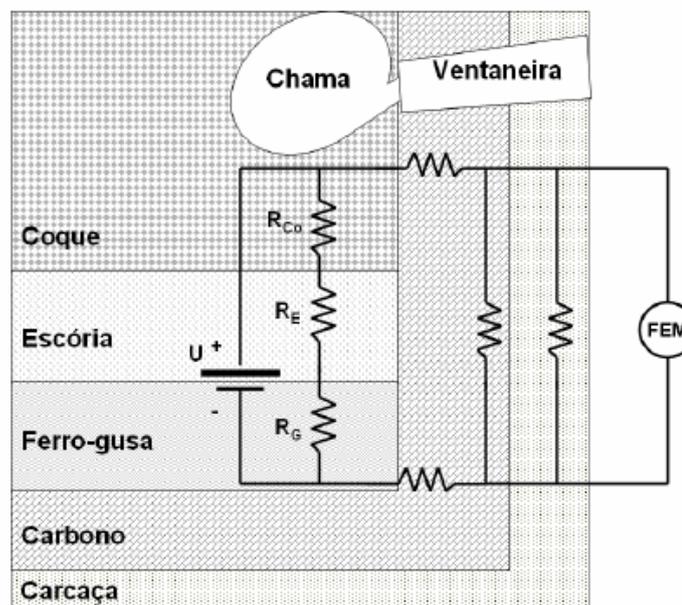


Figura 10: Circuito elétrico equivalente à geração de FEM na carcaça de um alto-forno

Fonte: Dorofeev e Novokhatskii (1984)

Com o alto-forno em uma dada condição operacional constante, U (tensão elétrica) 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).

O sinal produzido pela FEM gerada entre os pontos inferior e superior do cadinho é muito pequeno (variações menores que 1 milivolt) e consiste num somatório de 3 (três) componentes: básica, periódica e ruído (alta frequência). A primeira tem 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).

2.4.2 Equipamentos de medição

Para realizar a medição são utilizados 4 (quatro) pares de sensores na carcaça do alto-forno, um par por furo-de-gusa, conforme observado na Figura 11. 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). Cada conjunto de sensores é composto por parafusos de aço carbono soldados na carcaça do alto-forno. Para conexão elétrica, foram utilizados cabos de aço carbono.

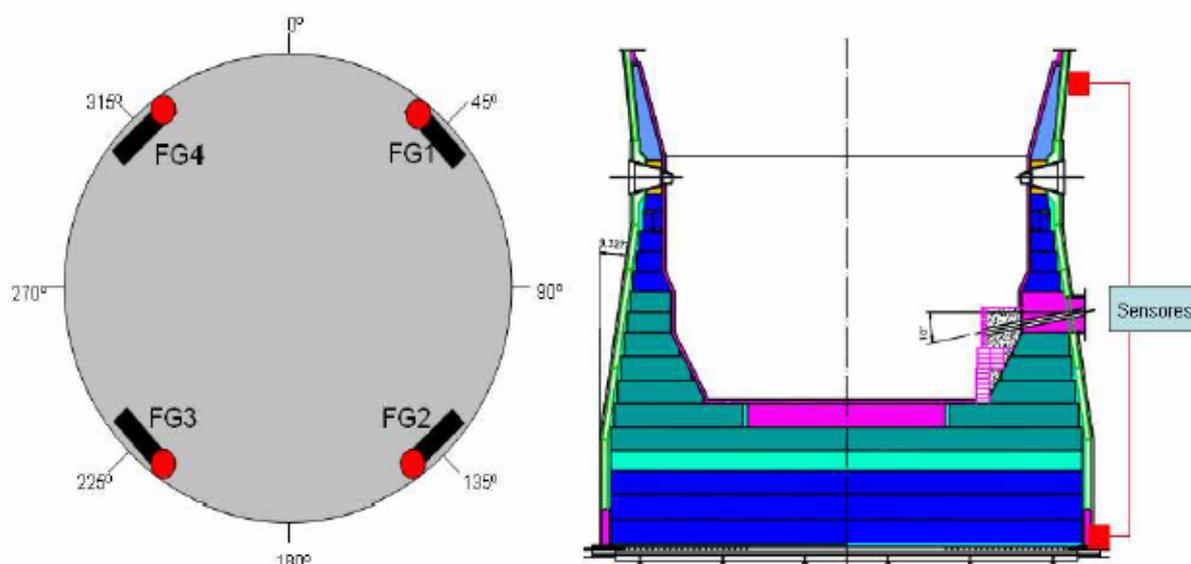


Figura 11: Posição dos sensores

Fonte: Gomes, Côco e Salles (2017)

Segundo [Dubovik et al. \(1982\)](#), a monitoração da variação da diferença da FEM por meio de pares de sensores, um sobre o nível do anel de vento e outro na região inferior do cadinho possui boa correlação com o nível de líquidos no cadinho.

2.4.3 Comportamento da FEM no esgotamento

Como pode ser observado na [Figura 12](#), durante o tempo entre duas corridas, o sinal de 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, porque reflete a maior resistência interna no circuito elétrico devido à camada de escória estar no máximo e sua resistência ser muito elevada neste momento ([LEBED; SAFINA, 1990](#)).

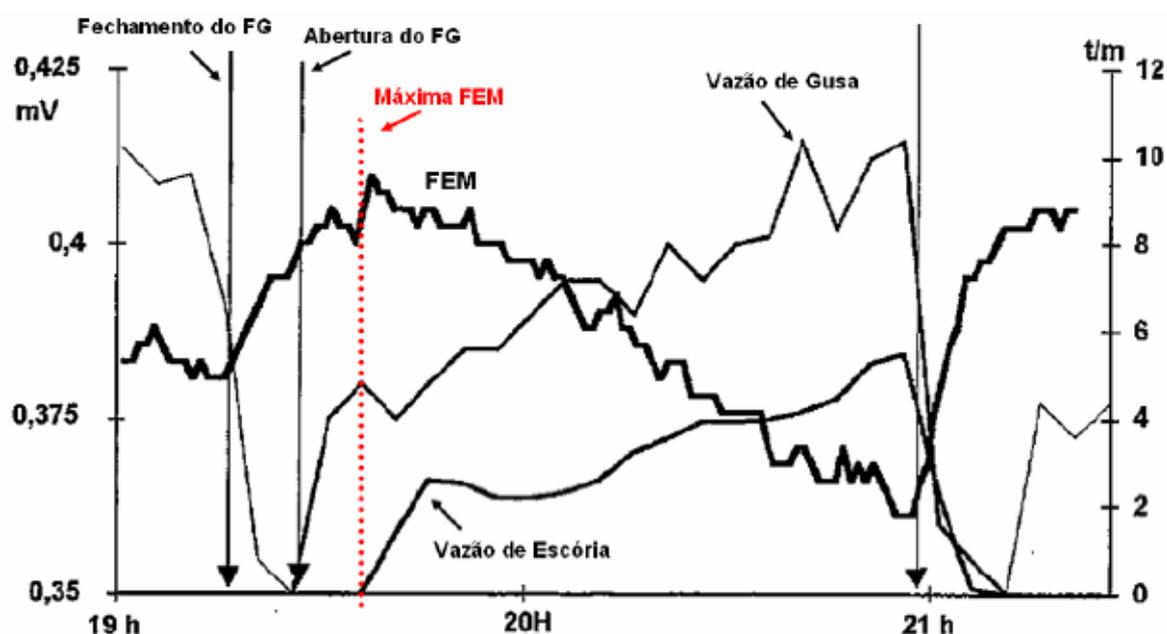


Figura 12: Comportamento da FEM no interior do alto-forno

Fonte: [Gomes, Côco e Salles \(2017\)](#)

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 torna-se maior, ocasionando uma elevação na vazão de esgotamento. Com esse 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.

De acordo com os estudos de [Gomes, Côco e Salles \(2017\)](#), 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 frequência:

Possui relação com a variação da resistência do circuito elétrico induzido pelas variações dos líquidos e suas quantidades.

- Sinal de baixa frequência:

Possui relação com as modificações no estado global do cadinho (permeabilidade, carga térmica, temperatura de gusa etc).

Sendo assim, o sinal de alta frequência está relacionado aos ruídos digitais que são gerados à partir de origem eletrônica (interferência eletromagnética, cabos corroídos) ou de eventos externos como: vento, vibrações, variações de temperatura, umidade etc, fazendo com que o sinal elétrico limpo sofra perturbações e não apresente seu verdadeiro comportamento. Por sua vez, o sinal de baixa frequência possui relação com as influências externas causadas por variáveis do processo como temperatura de gusa e carga térmica, que impactam fortemente no sinal de saída de FEM, fazendo que ele seja alterado à medida que as variações que ocorrem dentro do cadinho aconteçam.

3 Metodologia

Neste capítulo, serão apresentados os métodos de identificação de sistemas utilizados para a execução do estudo de caso.

Segundo [Montgomery, Runger e Calado \(2000\)](#), o método de engenharia é a abordagem para formular e resolver problemas. As etapas deste método são apresentadas a seguir:

1. Desenvolver uma descrição clara e concisa do problema;
2. Identificar os fatores importantes que afetam esse problema ou que possam desempenhar um papel na sua solução;
3. Propor um modelo para o problema, usando conhecimento científico ou de engenharia do fenômeno sendo estudado;
4. Conduzir experimentos apropriados e coletar dados para testar ou validar o modelo ou conclusões feitas;
5. Refinar o modelo, com base nos dados observados;
6. Manipular o modelo de modo a ajudar no desenvolvimento da solução do problema;
7. Conduzir um experimento apropriado para confirmar que a solução proposta para o problema é efetiva e eficiente;
8. Tirar conclusões baseadas na solução do problema.

3.1 Análise da correlação

A associação entre duas variáveis poder ser de dois tipos: correlacional e experimental. Numa relação experimental os valores de uma das variáveis são controlados pela atribuição ao acaso do objeto sendo estudado e observando o que acontece com os valores da outra variável.

No relacionamento correlacional, por outro lado, não se tem nenhum controle sobre as variáveis sendo estudadas. Elas são observadas como ocorrem no ambiente natural, sem nenhuma interferência, isto é, as duas variáveis são aleatórias. Assim a diferença entre as duas situações é que na experimental nós atribuímos valores ao acaso de uma forma não tendenciosa e na outra a atribuição é feita pela natureza.

Frequentemente é necessário estudar o relacionamento entre duas ou mais variáveis. Ao estudo do relacionamento entre duas ou mais variáveis denominamos de correlação e regressão. Se o estudo tratar apenas de duas variáveis tem-se a correlação e a regressão simples. Se envolver mais do que duas variáveis, tem-se a correlação e a regressão múltiplas. A regressão e a correlação tratam apenas do relacionamento do tipo linear entre duas variáveis (BUSSAB; MORETTIN, 2010).

A análise de correlação fornece um número que resume o grau de relacionamento linear entre as duas variáveis. Já a análise de regressão fornece uma equação que descreve o comportamento de uma das variáveis em função do comportamento da outra variável.

3.2 Modelagem e identificação de sistemas

3.2.1 Séries temporais

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 exatidão. A ideia básica por trás dos procedimentos baseia-se em 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 (MORETTIN; TOLOI, 2006).

3.2.2 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 (AGUIRRE, 2007).

A seguir, mencionam-se alguns dos mais comuns.

- Modelos estatísticos e dinâmicos:

Modelos estatísticos relacionam variáveis sem quantificar sua dependência temporal. Se a evolução temporal de um sistema é desejada, modelos dinâmicos devem ser usados. Modelos estatísticos são normalmente descritos por equações algébricas, ao passo que modelos dinâmicos são compostos por equações diferenciais, sendo que tais modelos podem também incluir equações algébricas.

Todo sistema real é, em última análise, dinâmico. A opção por descrever um sistema real por um modelo estático é viável quando a sua dinâmica (variações no tempo) não é relevante. Esse é o caso quando a dinâmica é muito rápida ou muito lenta, se comparada com a escala de tempo de interesse.

- Modelos discretos e contínuos:

Os termos discreto e contínuo se referem ao tempo. Modelos dinâmicos contínuos são descritos por equações diferenciais e representam a evolução do sistema continuamente no tempo. Em contraste, modelos dinâmicos discretos no tempo representam a evolução do sistema em instantes discretos e são descritos por equações a diferença.

A maioria dos métodos determinísticos de identificação fornece modelos contínuos ainda que os dados obtidos em instantes específicos no tempo, ou seja, os dados são amostrados. Por outro lado, a grande maioria dos métodos estocásticos de identificação resultam em modelos discretos no tempo, ainda que praticamente todos os sistemas reais sejam contínuos no tempo.

3.2.3 Identificação de sistemas

Um modelo que representa um sistema é determinado pela descrição de todas suas propriedades ou somente alguma delas, destinado a uma aplicação específica. O modelo não necessita ser uma descrição precisa do sistema, basta que o mesmo cumpra com os propósitos definidos (LJUNG, 1998).

A classificação dos métodos de identificação de sistemas pode ser feita de duas formas:

- Identificação completa:

Não se tem nenhuma informação do sistema;

- Identificação parcial:

Tem-se informações básicas do problema, como por exemplo, linearidade.

Um dos principais atributos da identificação de sistemas é a construção e a seleção de modelos de sistemas dinâmicos que servem a propósitos bem definidos.

Principais etapas na identificação de sistemas:

1. Especificar e parametrizar modelos matemáticos que representem o sistema a ser identificado;
2. Identificar os parâmetros do modelo escolhido que melhor se relacionam ao sistema;

3. Validar o modelo para verificar se o escolhido corresponde as expectativas finais.

A metodologia para a identificação dos parâmetros, pode ser a seguinte:

- Offline:

A entrada e saída do processo são gravadas e obtêm-se os parâmetros do modelo para o processo.

- Online:

Os parâmetros são calculados de forma recursiva à medida que um novo conjunto de dados está disponível, assim, a cada novo conjunto de dados os parâmetros são corrigidos. Este processo pode ser feito rapidamente à medida que o sistema muda. Esta metodologia é chamada de identificação em tempo real.

A obtenção dos parâmetros pode ser calculada pelo método de mínimos de quadrados para sistemas lineares nos parâmetros. Para ajuste de modelos não lineares podem ser utilizados métodos baseados no gradiente ou algoritmos genéticos.

3.2.3.1 Modelagem matemática

O conjunto de equações que representam a dinâmica de um sistema precisamente é definido como sendo o modelo matemático de sistemas dinâmicos. Este é o primeiro passo para a representação de modelos dinâmicos, sendo considerada a parte mais importante para a identificação (OGATA; SEVERO, 1998).

Inicia-se com a utilização de um modelo simplificado para descrever um comportamento básico do processo e posteriormente, se necessário, aumenta-se gradativamente a complexidade do modelo.

Segundo Ljung (1998), modelos matemáticos podem ser caracterizados como sendo um modelo contínuo ou discreto em relação ao tempo, determinístico ou estocástico, linear ou não-linear, entre outros.

Alguns dos modelos utilizados, para modelar sistemas lineares são os modelos auto-regressivos, como o modelo auto-regressivo com entradas exógenas (ARX) e o modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX).

3.2.3.2 Modelo ARX

Segundo Aguirre (2007), o modelo auto-regressivo com entradas exógenas (ARX do inglês, *autoregressive with exogenous inputs*) pode ser obtido a partir do modelo geral:

$$A(q)y(k) = \frac{B(q)}{F(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)}\nu(k), \quad (3.1)$$

$$y(k) = \frac{B(q)}{F(q)A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{D(q)A(q)}\nu(k),$$

$$y(k) = H(q)u(q) + G(q)\nu(q),$$

sendo q^{-1} o operador de atraso, de forma que $y(k)q^{-1} = y(k-1)$, $\nu(k)$ ruído branco e $A(q), B(q), C(q), D(q), F(q)$ os polinômios definidos a seguir:

$$\begin{aligned} A(q) &= 1 - a_1q^{-1} - \dots - a_{n_y}q^{-n_y}; \\ B(q) &= b_1q^{-1} + \dots + b_{n_u}q^{-n_u}; \\ C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + b_{n_\nu}q^{-n_\nu}; \\ D(q) &= 1 + d_1q^{-1} + \dots + b_{n_d}q^{-n_d}; \\ F(q) &= 1 + f_1q^{-1} + \dots + b_{n_f}q^{-n_f}; \end{aligned} \quad (3.2)$$

As funções $H(q)$ e $G(q)$ normalmente são referidas com as funções de transferência do processo e do ruído, respectivamente.

Tomando-se $C(q) = D(q) = F(q) = 1$ sendo $A(q)$ e $B(q)$ polinômios arbitrários, resultando em:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + \nu(k) \quad (3.3)$$

$$e(k) = \nu(k)$$

Uma vez que o ruído $\nu(k)$ aparece indiretamente na equação, o modelo ARX é normalmente classificado como pertencendo à classe de modelos de erro na equação. O modelo da Eq. (3.3) pode ser reescrito da seguinte forma:

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{1}{A(q)}\nu(k) \quad (3.4)$$

o que coloca em evidência as funções de transferência do sistema $H(q) = B(q)/A(q)$ e de ruído $C(q)/[D(q)A(q)] = 1/A(q)$, conforme pode ser visualizado na [Figura 13](#).

A representação em (a) é equivalente à Eq. (3.4), que, após algumas manipulações pode ser representada na forma indicada em (b). Do esquema em (b) fica claro que o erro não aparece na saída.

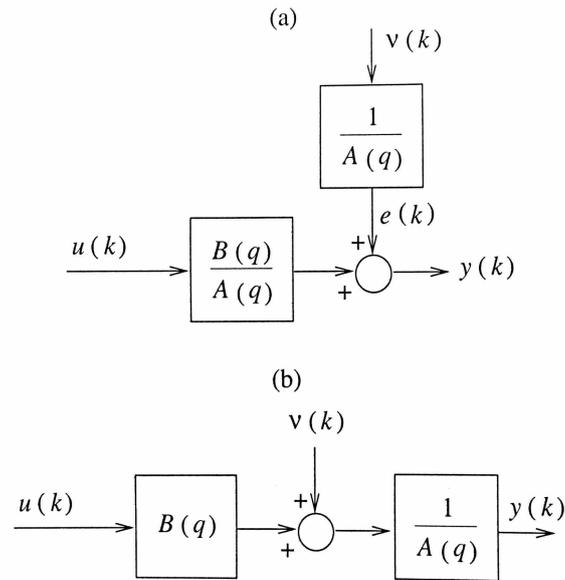


Figura 13: Representação esquemática do modelo ARX

Fonte: Aguirre (2007)

3.2.3.3 Modelo ARMAX

O modelo auto-regressivo com média móvel e entradas exógenas (ARMAX do inglês, *autoregressive moving average with exogenous inputs*) pode ser obtido a partir do modelo geral (3.1), tomando-se $D(q) = F(q) = 1$ e $A(q)$, $B(q)$ e $C(q)$ polinômios arbitrários, resultando em:

$$A(q)y(k) = B(q)u(k) + C(q)v(k), \quad (3.5)$$

ou, alternativamente,

$$y(k) = \frac{B(q)}{A(q)}u(k) + \frac{C(q)}{A(q)}v(k)$$

$$y(k) = H(q)u(k) + e(k), \quad (3.6)$$

sendo $e(k)$ não branco, conforme pode ser constatado na Figura 14.

A representação em (a) é equivalente à Eq. (3.6), que, após algumas manipulações, pode ser representada na forma indicada em (b).

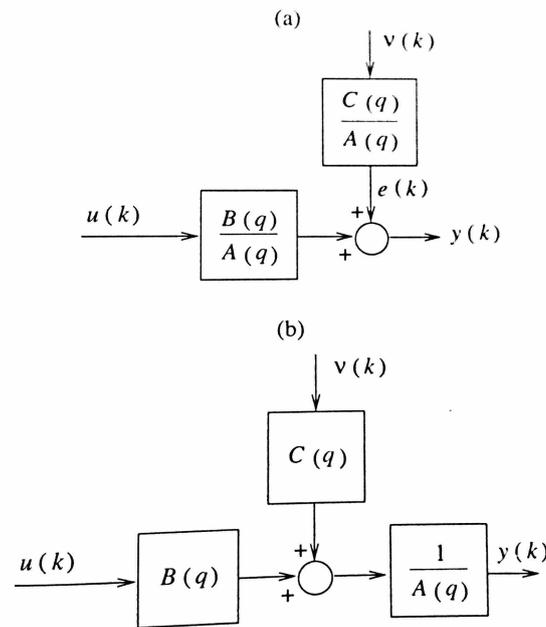


Figura 14: Representação esquemática do modelo ARMAX

Fonte: [Aguirre \(2007\)](#)

À semelhança do modelo ARX, o modelo ARMAX pertence à classe de modelos de erro na equação. Neste caso o erro na equação é modelado como um processo de média móvel (MA), e o ruído adicionado à saída, $e(k)$, é modelado como ruído branco filtrado pelo filtro ARMA, $C(q)/A(q)$.

3.2.3.4 O estimador de mínimos quadrados

O método dos mínimos quadrados é um dos mais conhecidos e mais utilizados nas mais diversas áreas de ciência e tecnologia. A ideia básica deste método pode ser encontrada nos trabalhos de [Gauss e Davis \(2004\)](#) sobre estudos astronômicos. Segundo [Hsia \(1977\)](#), a teoria de mínimos quadrados foi desde então, tornando-se a principal ferramenta para a obtenção de parâmetros a partir de dados experimentais.

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).

Dada a variável y , que esta relacionada linearmente com um conjunto de n variáveis x , sendo $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$, tem-se:

$$y = \theta_1 x_1 + \theta_2 x_2 + \dots + \theta_n x_n \quad (3.7)$$

no qual $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)$ é um conjunto de parâmetros constantes. Assume-se que θ_i é desconhecido e deseja-se estimar seus valores através das variáveis y e x .

Assume-se um conjunto de m pontos observados de x e y , nos instantes de tempo dados por t_1, t_2, \dots, t_n e denota-se um conjunto de medidas dados por $y(i)$ e $x_1(i), x_2(i), \dots, x_n(i)$, sendo $i = 1, 2, \dots, n$. Assim, tem-se um conjunto com dado por m equações lineares:

$$\begin{aligned} y &= \theta_1 x_1(i) + \theta_2 x_2(i) + \dots + \theta_n x_n(i), \\ i &= 1, 2, \dots, n. \end{aligned} \quad (3.8)$$

A equação acima é chamada de função regressão e θ_i é chamado de coeficiente regressão.

O sistema de equações (3.8) pode ser escrito pela matriz:

$$y = X\theta \quad (3.9)$$

onde,

$$\begin{bmatrix} y(1) \\ y(2) \\ \vdots \\ y(m) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1(1) & \dots & x_n(1) \\ x_1(2) & \dots & x_n(1) \\ \vdots & & \vdots \\ x_1(m) & \dots & x_n(1) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \vdots \\ \theta_n \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Para estimar os n parâmetros θ_i , é necessário que $m \geq n$. Se $m = n$ então θ pode ser calculado por:

$$\hat{\theta} = X^{-1}y \quad (3.11)$$

com X^{-1} sendo a inversa da matriz quadrada de X e $\hat{\theta}$ sendo a estimativa de θ . Contudo, quando $m > n$ não é possível determinar um conjunto de θ_i que satisfaça as m equações. Este problema pode ser colocado como um problema de otimização, minimizando o erro entre o modelo e os dados experimentais a partir do ajuste de θ .

Definindo um vetor para o erro como sendo $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_m)^T$:

$$\varepsilon = y - X\theta \quad (3.12)$$

Determinando a função objetivo a ser minimizada:

$$J = \sum_{i=1}^m \varepsilon_i^2 = \varepsilon^T \varepsilon \quad (3.13)$$

Considerando que:

$$\begin{aligned} J &= (y - X\theta)^T(y - X\theta) \\ &= y^T y - \theta^T X^T y - y^T X\theta + \theta^T X^T X\theta \end{aligned} \quad (3.14)$$

Derivando J em relação θ e igualando a zero, temos o vetor $\hat{\theta}$ que minimiza J, logo:

$$\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}} = -2X^T y + 2X^T X\hat{\theta} = 0 \quad (3.15)$$

sendo assim,

$$X^T X\hat{\theta} = X^T y \quad (3.16)$$

na qual $\hat{\theta}$ pode ser resolvida por:

$$\hat{\theta} = (X^T X)^{-1} X^T y \quad (3.17)$$

Este resultado é chamado de estimador por mínimos quadrados (do inglês, LSE *least-squares estimator*) de θ . A Eq. (3.9) é referida como a equação normal e ε é chamado de resíduo.

3.2.4 Domínio da frequência

Em análise de sinais, o domínio da frequência representa a análise de funções matemáticas com respeito à frequência, em contraste com a análise no domínio do tempo. A representação no domínio da frequência pode também conter informação sobre deslocamentos de fase (BOASHASH, 1988).

Segundo Zadeh (1953), uma função pode ser convertida do domínio do tempo para o da frequência através de um operador matemático chamado genericamente de transformada integral. Um exemplo é a transformada de Fourier, que decompõe uma função na soma de um (potencialmente infinito) número de componentes senoidais, produzindo um espectro de frequências. A transformada inversa correspondente converte esse espectro de volta para o domínio do tempo, ou seja, para a função original.

Na [Figura 15](#), observa-se o sinal no domínio do tempo (quadro vermelho) que pode ser separado em várias ondas senoidais (vermelha, azul e preta) para formar o sinal no domínio da frequência (espectro representado no quadro azul).

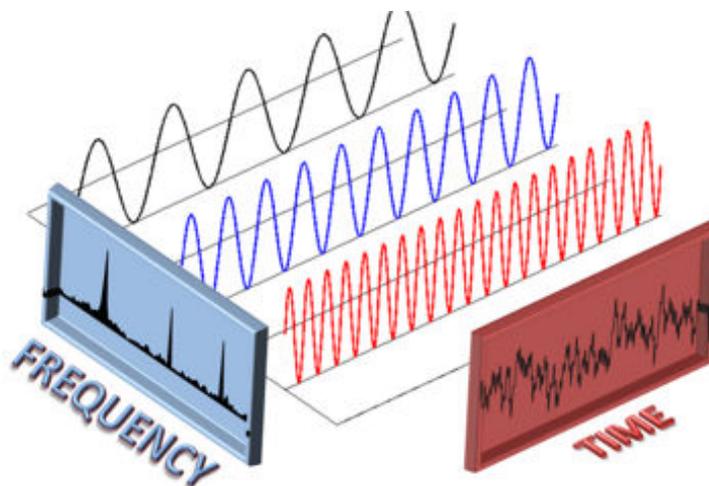


Figura 15: Relação entre sinal no domínio do tempo e da frequência

Fonte: [SyNRG \(2017\)](#)

Ao aplicar-se a transformada de Fourier, passa-se do domínio do tempo para o domínio da frequência real. Neste domínio, a informação a respeito de deslocamentos de fase do sinal em função da frequência desaparece. Em contraste, ao aplicar-se a transformada de Laplace, passa-se ao domínio da frequência complexa no qual a informação a respeito de deslocamentos de fase do sinal é preservada.

A transformada de Fourier de um sinal periódico gera um espectro discreto no domínio da frequência. Isto é, um sinal periódico no tempo somente tem valor em alguns pontos do domínio da frequência, correspondentes às frequências das senoides que compõem o sinal no tempo.

De acordo com os estudos de [Hsu \(1973\)](#), um sinal periódico pode ser analisado utilizando-se de um domínio discreto de frequências. Por outro lado, um sinal discreto no tempo gera um espectro periódico na frequência. Desta forma, se considerarmos um sinal no tempo que é discreto e periódico, chega-se em um sinal na frequência que é, também, discreto e periódico. Neste contexto geralmente é utilizada a transformada discreta de Fourier, muito útil em análises digitais aonde os sinais são sempre discretos.

3.3 Filtros digitais

Um filtro digital usa computação para implementar a ação de filtragem que deve ser executada num sinal de tempo contínuo. A [Figura 16](#) mostra o diagrama de blocos das operações envolvidas em tal abordagem para projetar um filtro seletivo de frequências ([HAYKIN; VEEN, 2001](#)).

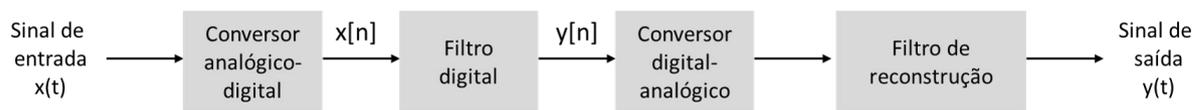


Figura 16: Sistema para filtrar um sinal de tempo contínuo

Fonte: [Haykin e Veen \(2001\)](#)

O bloco rotulado conversor analógico-digital (A/D) é usado para converter o sinal de tempo contínuo $x(t)$ numa sequência $x[n]$ de números. O filtro digital processa a sequência de números $x[n]$ numa base de amostra por amostra para produzir uma nova sequência de números, $y[n]$, a qual é então convertida em um sinal de tempo contínuo correspondente pelo conversor digital-analógico (D/A). Finalmente, o filtro de reconstrução na saída do sistema produz um sinal de tempo contínuo $y(t)$, representando a versão filtrada do sinal de entrada original $x(t)$.

Há duas classe de filtros digitais, dependendo da duração da resposta ao impulso:

1. Filtros digitais de resposta ao impulso de duração finita (FIR):

Cuja operação é regida por equações lineares de diferenças com coeficientes constantes de natureza não-recursiva. A função de transferência de um filtro digital FIR é um polinômio em z^{-1} .

2. Filtros digitais de resposta ao impulso de duração infinita (IIR):

Cujas características de entrada e saída são regidas por equações lineares de diferenças com coeficientes constantes de natureza recursiva. A função de transferência de um filtro digital IIR é uma função racional em z^{-1} .

Nesse trabalho, utiliza-se filtros digitais de resposta ao impulso de duração finita (FIR), especificamente o filtro rejeita-faixas que caracteriza-se como um filtro que permite a passagem da maioria das frequências inalteradas, porém atenua aquelas que estejam em uma faixa determinada pelo filtro (região entre w_1 e w_2), conforme pode ser observado na Figura 17.

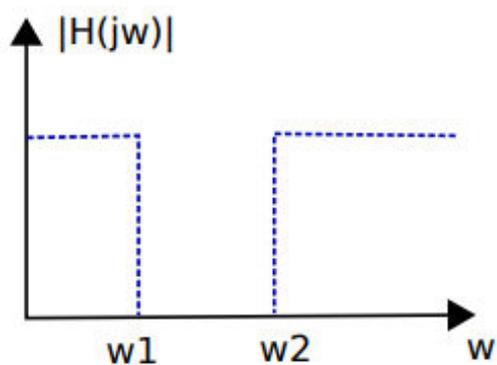


Figura 17: Filtro digital Rejeita-Faixa

Fonte: Adaptado de [Haykin e Veen \(2001\)](#)

4 Resultados

Como estudo de caso, foram utilizados os dados históricos da prática de corrida de 4 furos de gusa (média do sinal) de um Alto-Forno de uma Companhia Siderúrgica localizada na região de Minas Gerais.

Foi realizada uma modelagem dos níveis de líquidos que auxilie na tomada de decisão sobre o instante de abertura do furo de gusa e seu tamponamento, para tornar esta operação mais confiável e assertiva, trazendo uma otimização do processo.

O trabalho elaborado para a modelagem do nível dos líquidos no interior de cadinho de altos-fornos foi desenvolvido através das seguintes etapas:

- Análise da correlação das variáveis;
- Modelagem da FEM por modelo ARX;
- Filtragem do sinal do nível de líquidos;
- Modelagem e predição do nível por séries temporais.

4.1 Dados históricos

Como os 4 (quatro) sinais obtidos, de cada furo de gusa apresentam similaridades, foi adotada a média destes sinais para utilização neste trabalho. Os dados apresentados são correspondentes a uma análise de 8 dias de medição, conforme o gráfico da [Figura 18](#).

A frequência de amostragem é normalmente escolhida entre 5 e 10 vezes maior do que a maior frequência de interesse contida nos dados [Aguirre \(2007\)](#). Foi utilizada uma taxa de amostragem de $t = 10$ minutos para um ciclo médio de corrida de 150 minutos, ficando dentro desse intervalo.

Nota-se que o sinal (média dos sinais de campo) apresenta-se como sendo não estacionário, ou seja, não apresenta as mesmas componentes de frequência durante sua duração. Isso é devido à sua componente de frequência correlacionada ao estado térmico e químico do cadinho ([PRONIN, 1985](#)).

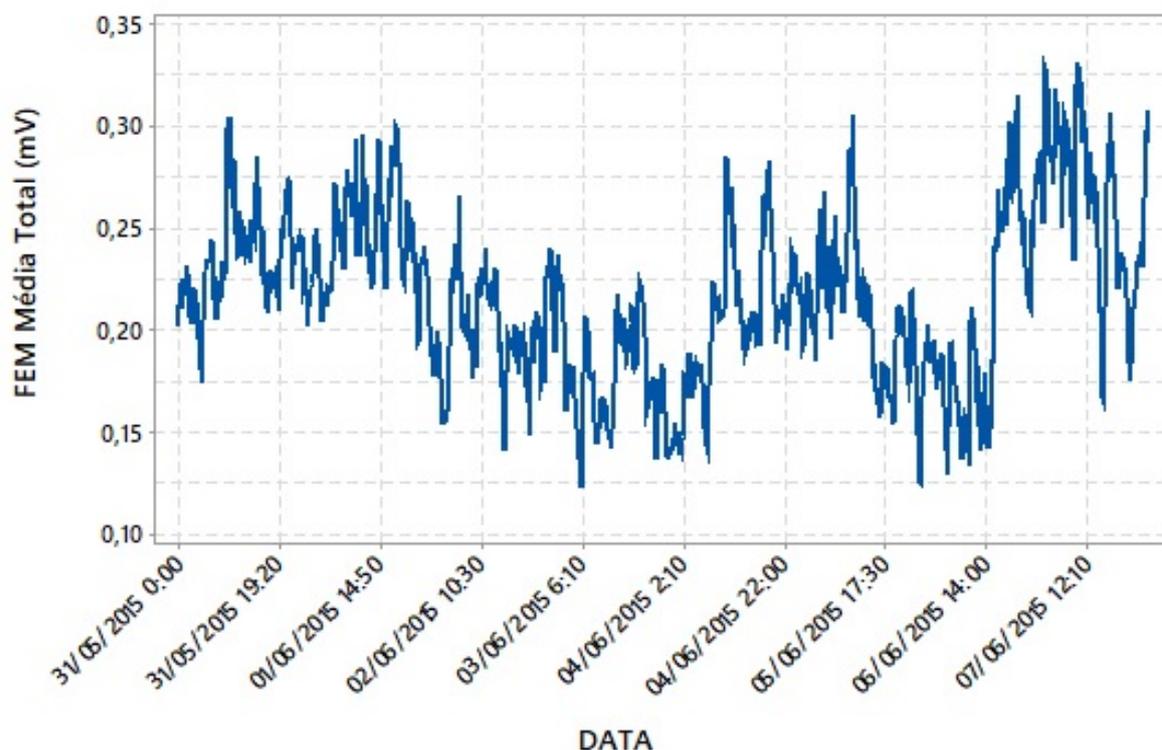


Figura 18: Gráfico da Série temporal de FEM - 8 dias

Fonte: Autor

4.2 Correlação das variáveis

A partir de literatura especializada e informações de consultores e operadores do alto-forno em estudo, foi considerado um sistema onde as entradas são: a média dos furos de gusa em operação, a temperatura de ferro-gusa no canal, a carga térmica do corpo do alto-forno e a pressão de sopra. Acredita-se que essas variáveis são as mais impactantes na influência sobre o sinal de FEM e devem ser filtradas.

Para avaliação dos resultados foi utilizado o software Minitab com objetivo de obter comprovação estatística das análises realizadas. Foram utilizados como referência para as análises no Minitab os estudos de Campos (2003), que englobam regressões lineares e correlação de entradas e saídas.

Em relação à Figura 19, Figura 20 e Figura 21, pode-se observar o comportamento das variáveis estudadas em relação à saída.

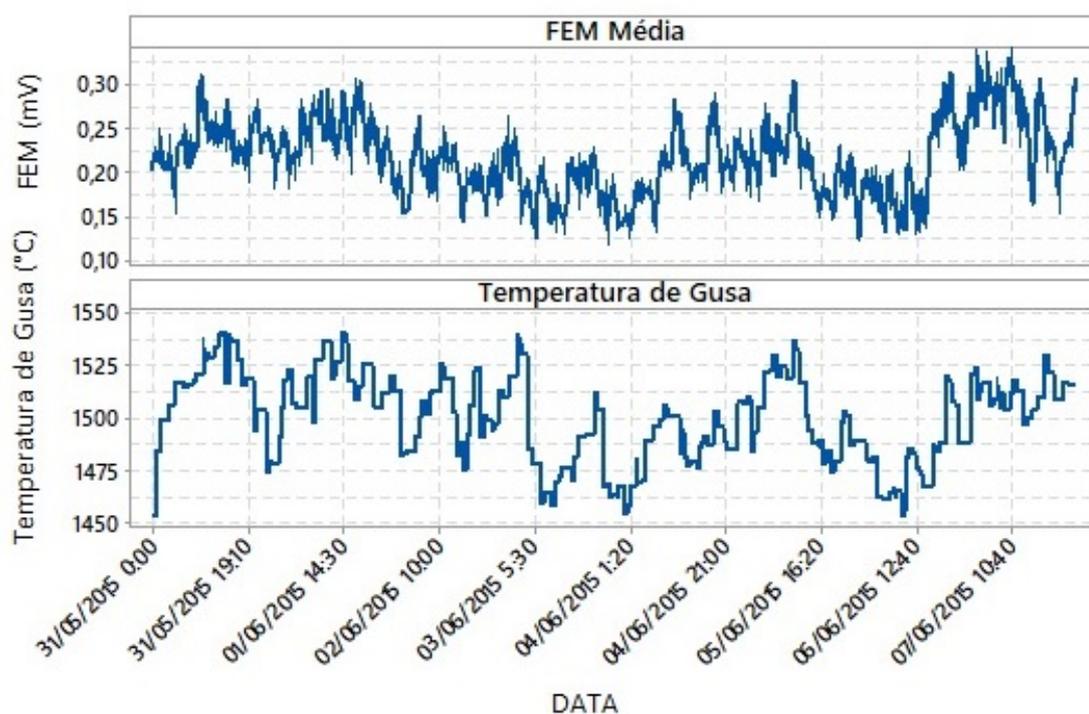


Figura 19: Gráfico da Série temporal de FEM e Temperatura de Gusa

Fonte: Autor

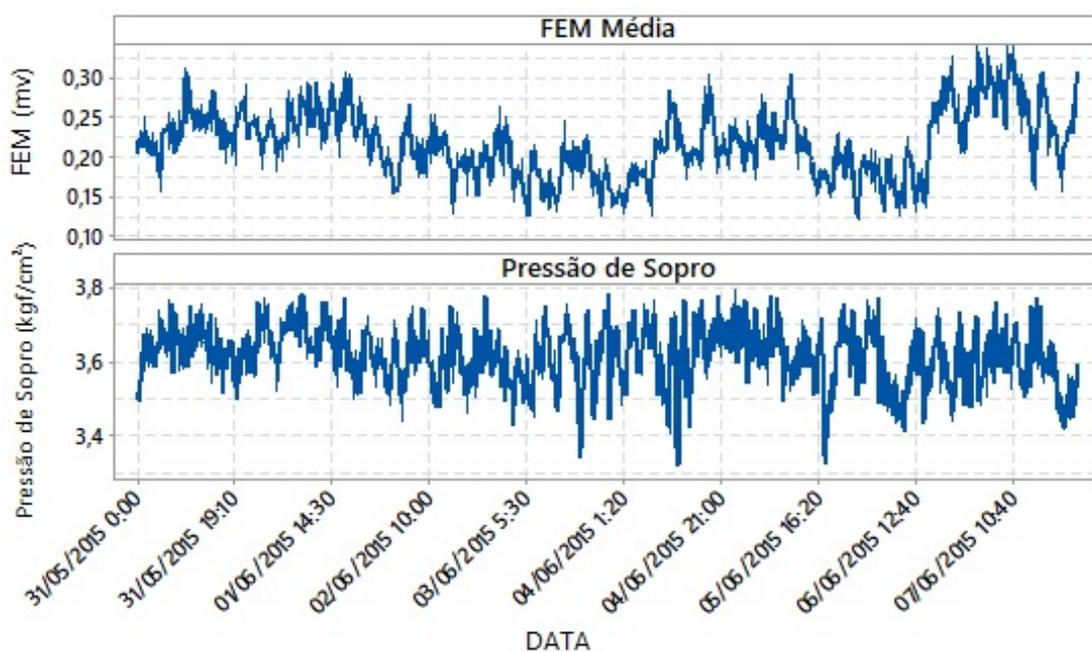


Figura 20: Gráfico da Série temporal de FEM e Pressão de Sopro

Fonte: Autor

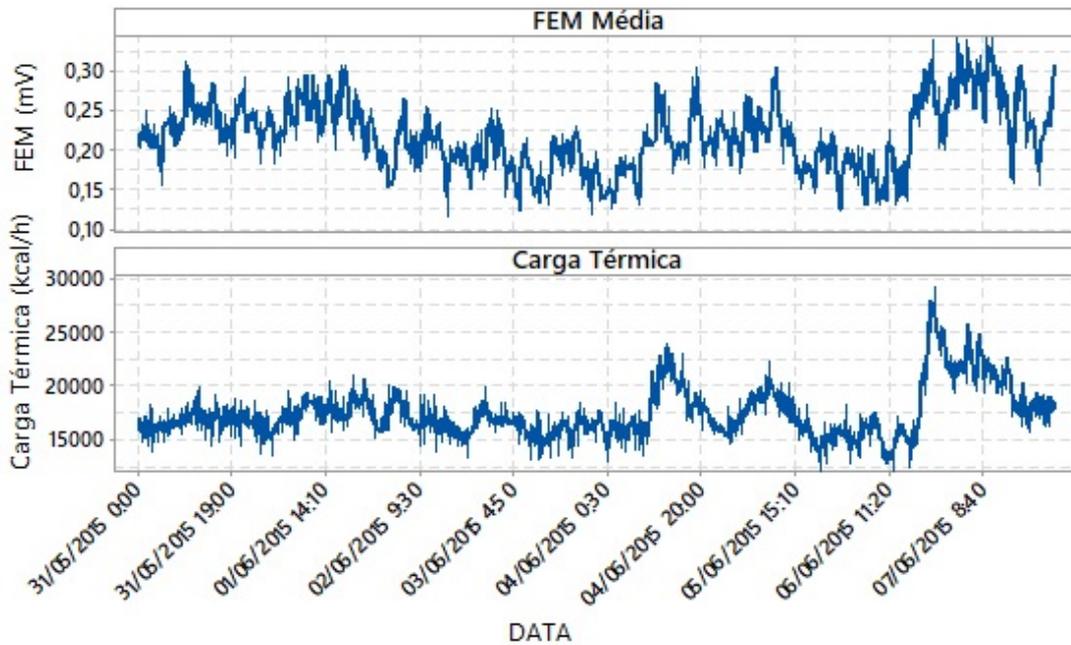


Figura 21: Gráfico da Série temporal de FEM e Carga Térmica

Fonte: Autor

Observa-se na [Figura 22](#), [Figura 23](#) e [Figura 24](#), os gráficos de correlação e regressão entre as variáveis de entrada e a saída (FEM), que auxiliaram na análise da correlação das mesmas.

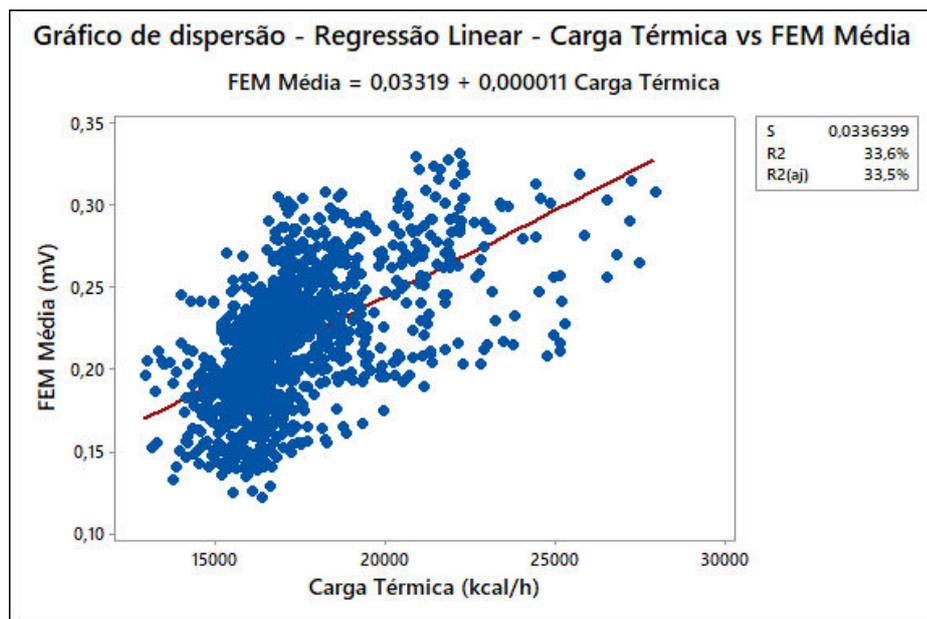


Figura 22: Gráfico de dispersão - Correlação entre Carga Térmica vs FEM

Fonte: Autor

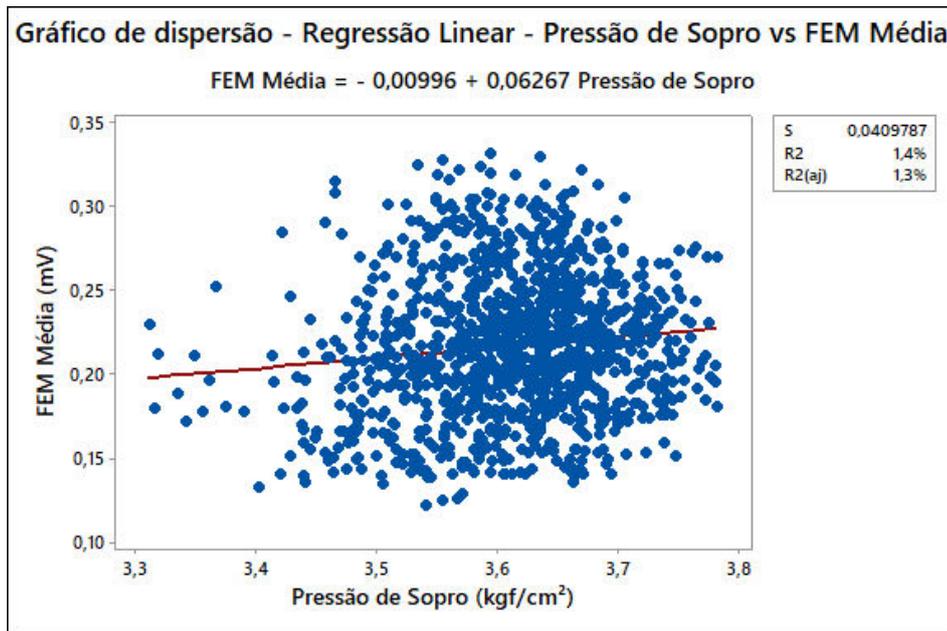


Figura 23: Gráfico de dispersão - Correlação entre Pressão de Sopros vs FEM

Fonte: Autor

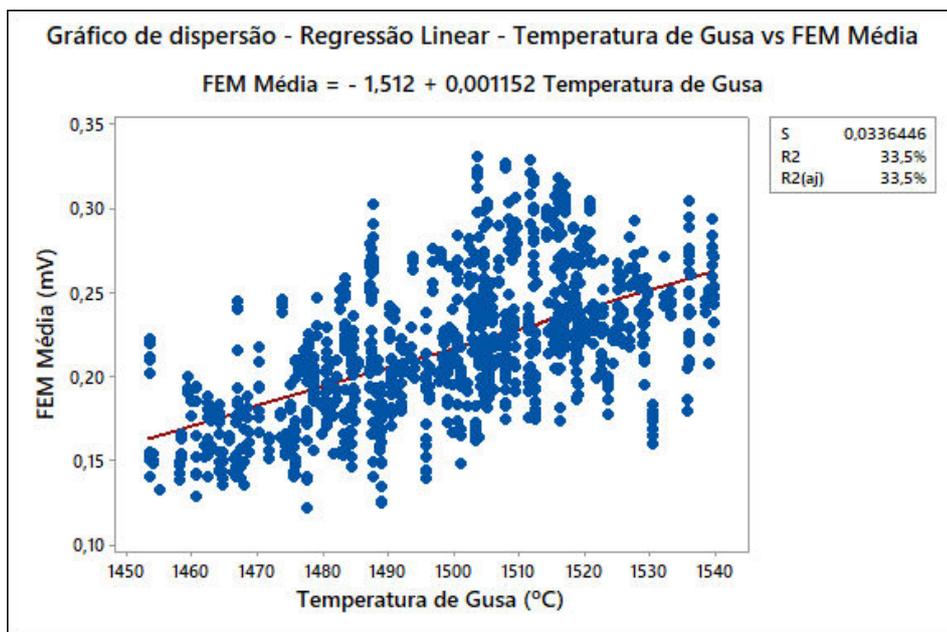


Figura 24: Gráfico de dispersão - Correlação entre Temperatura de Gusa vs FEM

Fonte: Autor

Segundo Campos (2003), a correlação entre variáveis pode ser avaliada conforme Tabela 1.

Tabela 1: Grau de correlação

R^2	GRAU DE CORRELAÇÃO
1,0	Correlação perfeita
>0,9	Correlação muito forte
>0,6	Correlação forte
>0,3	Correlação moderada
>0,2	Correlação fraca
0,0	Correlação inexistente

Esta etapa consistiu na análise de correlação dos sinais coletados a fim de identificar quais deles seriam estatisticamente relacionados. Como pode ser visto na Tabela 2 abaixo, verifica-se que há baixa correlação das entradas com a saída, mesmo sabendo que as variáveis de entrada são responsáveis pelas mudanças no sinal de saída.

Tabela 2: Correlação entre entradas e saída

Entradas	Coefficiente (%)
Temperatura de Gusa	33,5%
Carga Térmica	33,6%
Pressão de Sopro	1,4%

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

Portanto, essa desassociação faz com que uma análise mais a fundo seja realizada para que identifique-se o grau de impacto dessas variáveis no sinal de FEM, posto que esses parâmetros mascaram o verdadeiro comportamento do sinal. Partiu-se então para a análise de séries temporais, que permite detectar regularidades nas observações das variáveis e encontrar a lei que as define.

4.3 Modelagem da FEM por modelo ARX

Devido aos resultados obtidos na seção anterior, um modelo ARX foi implementado com o intuito de observar a resposta do sinal em relação às entradas. A escolha deste modelo deve-se ao fato de que o mesmo possui a característica de estimar a série de interesse com base em variáveis exógenas e captar suas componentes de tendência e sazonais, fato de extrema utilidade para o estudo de séries com influências externas.

Foi então realizada a modelagem para um modelo ARX [2 2 0 1], utilizando-se mínimos quadrados como método de estimação de parâmetros, para as três entradas consideradas. A modelagem e escolha da ordem do polinômio foi feita utilizando o pacote de identificação de sistemas do software Matlab, que auxiliou na obtenção ótima dos parâmetros.

Onde, as ordens do polinômio [na nb nc nk] do ARX são:

- na = 2: é a ordem do polinômio A(q);
- nb = 2: é a ordem do polinômio B(q) + 1;
- nc = 0: é a ordem do polinômio C(q);
- nk = 1: é o atraso da relação entrada-saída.

Obteve-se a seguinte saída, após simulação computacional, conforme [Figura 25](#), indicando uma faixa de estimação com 50,5% de exatidão (baixa porcentagem de predição).

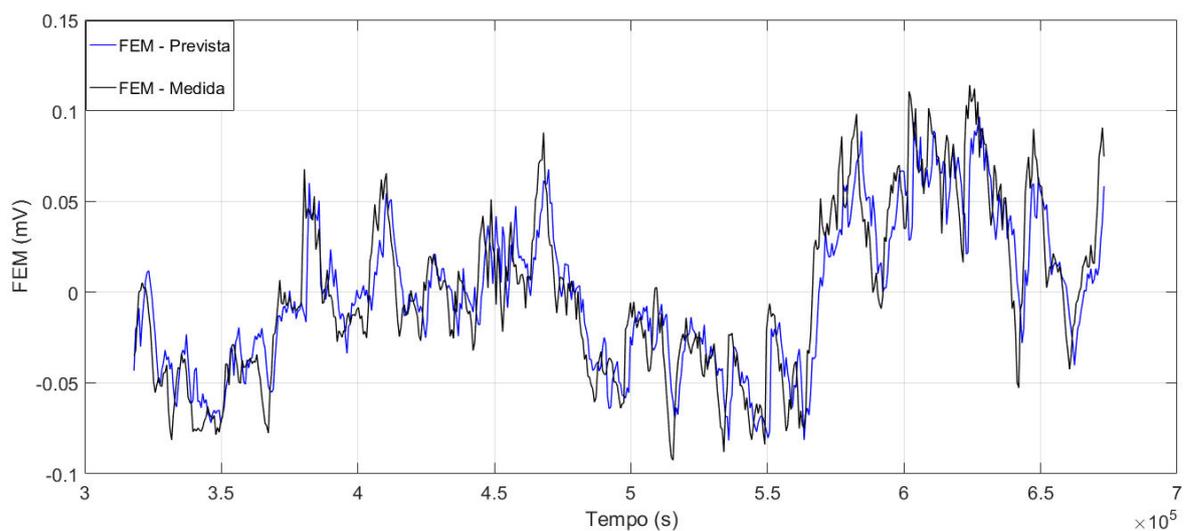


Figura 25: Gráfico ARX - FEM Medida e previsão para 3 passos à frente

Tem-se a seguinte equação resultante da modelagem pelo modelo ARX [2 2 0 1]:

$$y(t) = 0,9872y_{(t-1)} - 0,9204y_{(t-2)} + 0,0001322u_{1(t-1)} - 5,379 * 10^{-5}u_{1(t-2)} - 6,893 * 10^{-7}u_{2(t-1)} + 1,461 * 10^{-6}u_{2(t-2)} + 0,06594u_{3(t-1)} - 0,04603u_{3(t-2)} \quad (4.1)$$

Onde,

- y é o sinal de FEM;
- u_1 é a temperatura de gusa;
- u_2 é a carga térmica;
- u_3 é a pressão de sopro.

Analisando a Eq. (4.1) obtida acima, observa-se que a saída do sistema depende fracamente das entradas selecionadas e fortemente de seus valores passados. Esperava-se poder observar a real influência das variáveis na saída, mas o resultado gráfico e a equação obtida demonstram que este não é o método mais assertivo para essa análise. Portanto indica que esse sinal deve ser analisado no domínio da frequência para que possam ser observadas as influências de cada variável no sinal de FEM.

4.4 Filtragem do sinal

A FEM gerada na carcaça do alto-forno é afetada por diversos fatores (nível dos líquidos, temperatura de gusa, pressão de sopro, estado termoquímico do cadinho, carga térmica etc). Estes efeitos são indesejáveis para a modelagem pois dificultam a análise comparativa entre esgotamentos atuais e passados e também, impossibilitam a identificação por meio de séries temporais.

Diante disso, para realizar a separação do sinal de nível dos líquidos no interior do cadinho da FEM, torna-se necessária a compreensão detalhada do sinal através de análises temporais e espectro de frequência (periodograma) e processamento digital do sinal (TIAN, 2012).

Para analisar os dados com horizonte mais amplo, coletou-se uma base de dados de 15 dias de medição da FEM, como pode ser visualizado na [Figura 26](#).

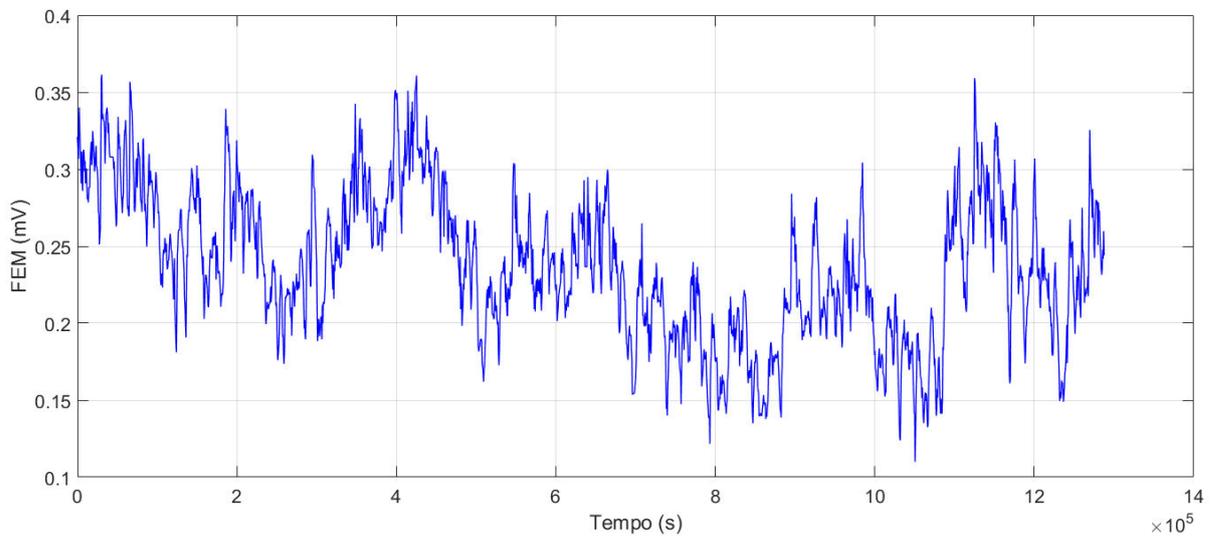


Figura 26: Gráfico da Série temporal de FEM - 15 dias

Fonte: Autor

Os dados foram então pré-processados, onde foi realizada a subtração prévia da média para eliminar as tendências lineares para fins de análise, obtendo o seguinte gráfico da [Figura 27](#).

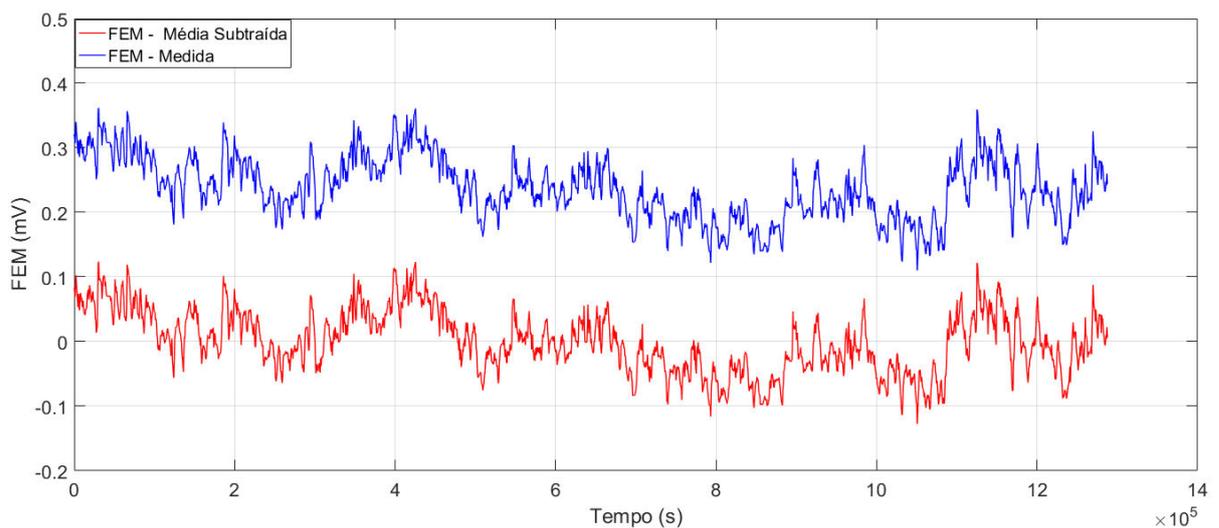


Figura 27: Gráfico da Série temporal de FEM Medida e FEM sem médias

Fonte: Autor

Em seguida realizou-se a análise do sinal no domínio da frequência, para observar os gráficos de periodograma das variáveis, em que pôde-se efetuar uma filtragem digital do sinal centralizada nas frequências demarcadas no gráfico para remover o ruído do sinal, através de um filtro rejeita-faixas entre 0,0013 e 0,005 rad/s, conforme pode ser visto na [Figura 28](#).

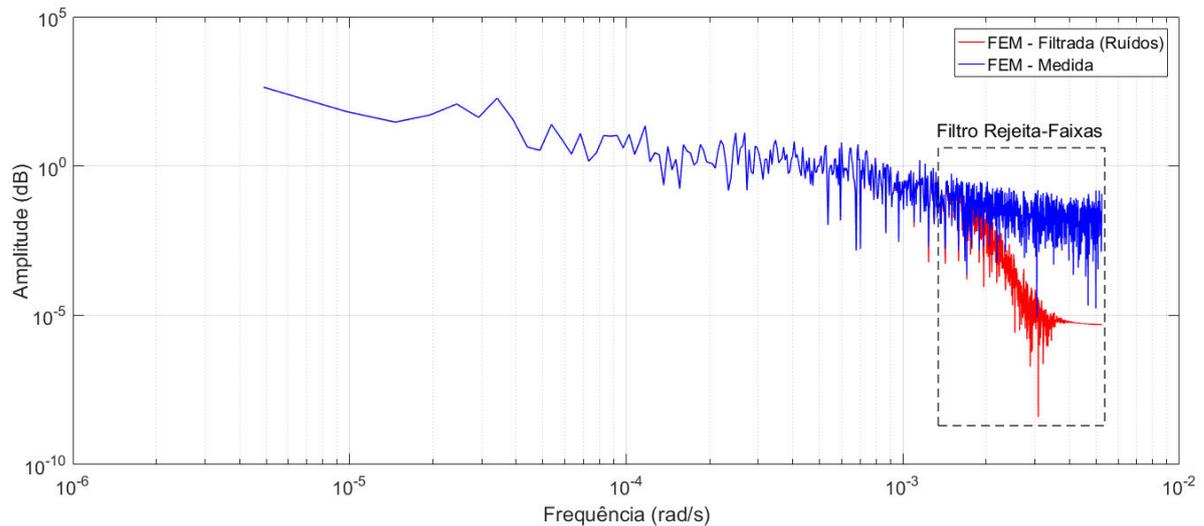


Figura 28: Gráfico do Periodograma de FEM - Domínio da frequência

Fonte: Autor

Pela análise do gráfico acima, identificou-se que existem algumas regiões de frequências dominantes no sinal. Segundo [Gomes, Côco e Salles \(2017\)](#), temos que as frequências muito baixas (entre $4,75 \times 10^{-6}$ e $5,0 \times 10^{-5}$ rad/s) estão relacionadas com a média do sinal e devem ser descartadas. As frequências médias (entre $5,0 \times 10^{-5}$ e 0,0013 rad/s) estão relacionadas com as aberturas e fechamentos dos furos-de-gusa. As frequências altas (entre 0,0013 e 0,005 rad/s) possuem densidades espectrais bem mais distribuídas e estão relacionadas, principalmente, aos ruídos de medição.

Após essa filtragem, o sinal obtido apresentou o seguinte comportamento, no domínio do tempo, conforme [Figura 29](#) abaixo. Nota-se que houve uma melhora na qualidade digital do sinal de saída em relação ao sinal de entrada, removendo-se os ruídos de medição, obtendo resultado satisfatório.

Segundo [Haykin e Veen \(2001\)](#), em alguns casos observa-se uma defasagem do sinal em relação ao outro após a aplicação do filtro, mas esta defasagem não atrapalha no resultado final nem na aplicação no sistema, pois as constantes de tempo do processo no alto-forno estão em torno de 6 a 8 horas, sendo que a defasagem está em torno de aproximadamente 15 a 20 minutos.

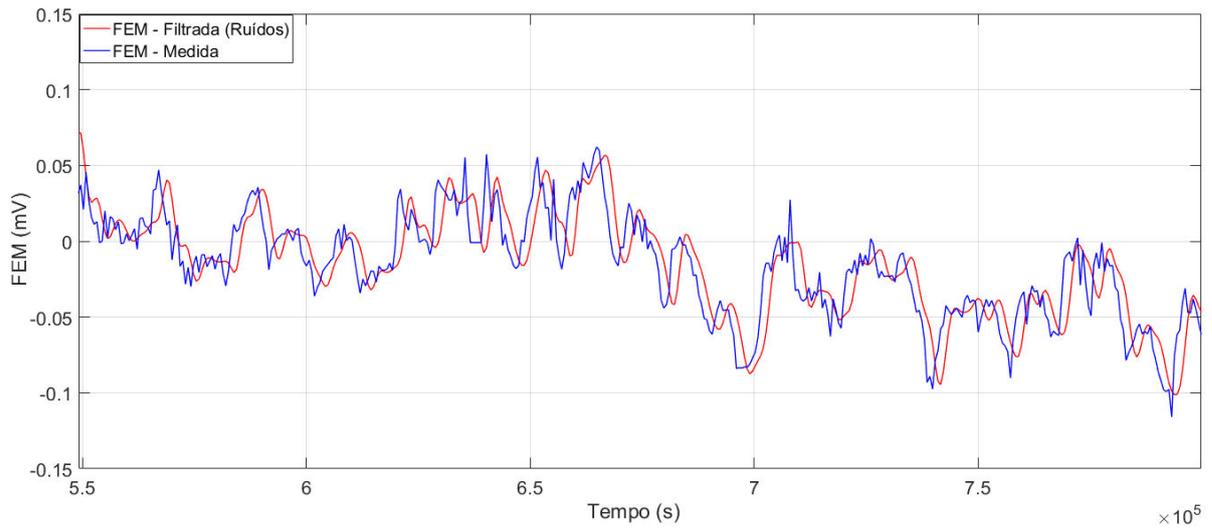


Figura 29: Gráfico da Série Temporal de FEM - Domínio do tempo

Fonte: Autor

Dando continuidade ao processamento digital do sinal, utilizou-se os mesmos métodos citados acima para realizar a filtragem da dependência do sinal com as variáveis de entrada, que influenciam a saída, utilizando um filtro rejeita-faixas.

Na Figura 30, tem-se o gráfico do periodograma de FEM após a aplicação do filtro digital rejeita-faixas da região demarcada no gráfico, demonstrando que houve atenuação significativa do sinal nas frequências que estavam no intervalo especificado dos filtros digitais.

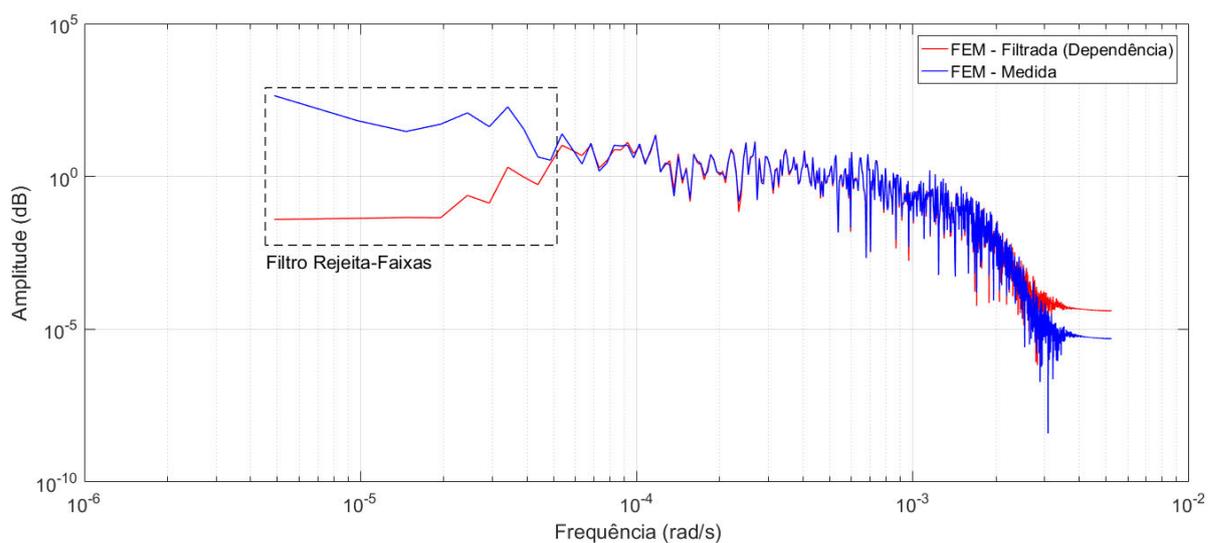


Figura 30: Gráfico do Periodograma de FEM - Domínio da Frequência

Fonte: Autor

Após essa filtragem nas frequências entre $4,75 \times 10^{-6}$ e $5,0 \times 10^{-5}$ rad/s, o sinal obtido apresentou o comportamento, no domínio do tempo, conforme [Figura 31](#). Nota-se que não há mais dependência do sinal com as variáveis de entrada (oscilações de baixa frequência) e os dados centralizados, o que propicia condições que habilitam a identificação do mesmo via teoria de séries temporais.

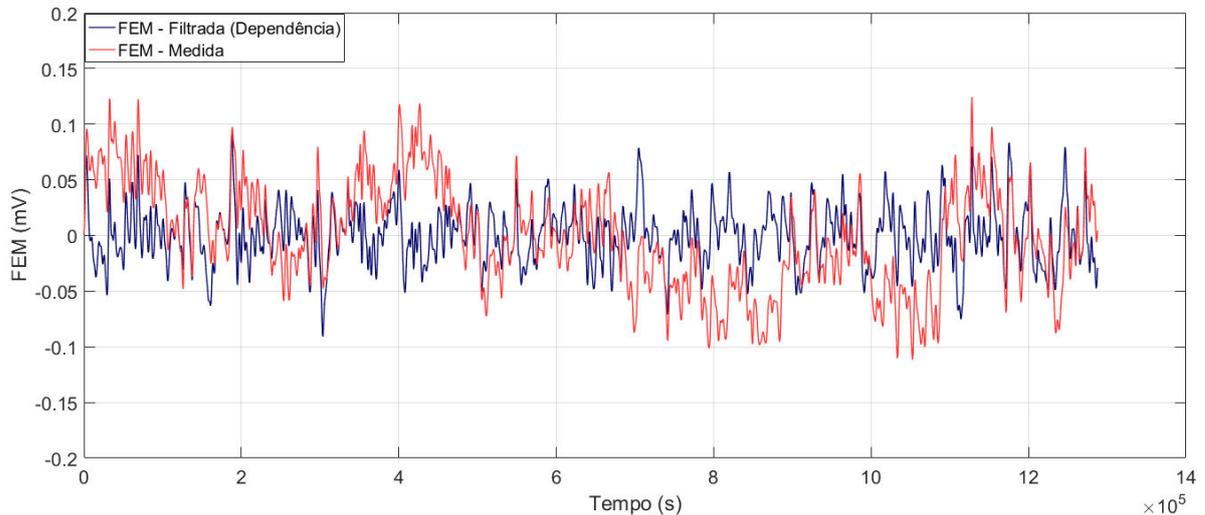


Figura 31: Gráfico da Série Temporal de FEM - Domínio do Tempo

Fonte: Autor

4.5 Modelagem e previsão da FEM por séries temporais

Com os dados já enquadrados em padrões aceitáveis para a modelagem em séries temporais e como não há mais dependência do sinal com as variáveis de entrada (entradas exógenas), partiu-se para a modelagem e previsão da FEM por meio da estimação de parâmetros de um modelo auto-regressivo sem entradas exógenas (AR), analisando somente a variável de FEM e seus dados passados.

A ordem do modelo AR (15) foi escolhida com o auxílio do software Matlab, que realizou iterações até identificar a ordem ótima do polinômio, obtendo assim a melhor resposta e precisão no polinômio de ordem 15. O foco é a previsão de 3 (três) passos à frente, ou seja, 30 minutos de previsão.

Obteve-se o seguinte polinômio para o AR de ordem 15 gerando a Eq. (4.2), onde $y(t)$ é o sinal de FEM.

$$\begin{aligned}
 y(t) = & 6,13y_{(t-1)} - 19,54y_{(t-2)} + 43,08y_{(t-3)} - 73,72y_{(t-4)} + 104,1y_{(t-5)} \\
 & - 125,7y_{(t-6)} + 132,3y_{(t-7)} - 122,5y_{(t-8)} + 99,83y_{(t-9)} - 70,9y_{(t-10)} \\
 & + 43,09y_{(t-11)} - 21,66y_{(t-12)} + 8,489y_{(t-13)} - 2,314y_{(t-14)} + 0,3289y_{(t-15)}
 \end{aligned} \quad (4.2)$$

Com base no modelo acima, a etapa seguinte foi a simulação da previsão para 03 (três) passos à frente, ou seja, 30 (trinta) minutos de previsão. Essa apresentou bons resultados, com uma faixa de estimacão com 81,72% de exatidão (foco de predicão), conforme pode ser visualizado na Figura 32, indicando assim, o nível real e “puro” de FEM, que é confiável e representa claramente as práticas de esgotamento e tamponamento dos furos-de-gusa do cadinho do alto-forno, fazendo com que seja possível antecipar um atraso de escória, abertura de paralela, a vazão de esgotamento, ou seja, tem-se em recurso adicional para tomadas de decisão em situações de instabilidade operacional.

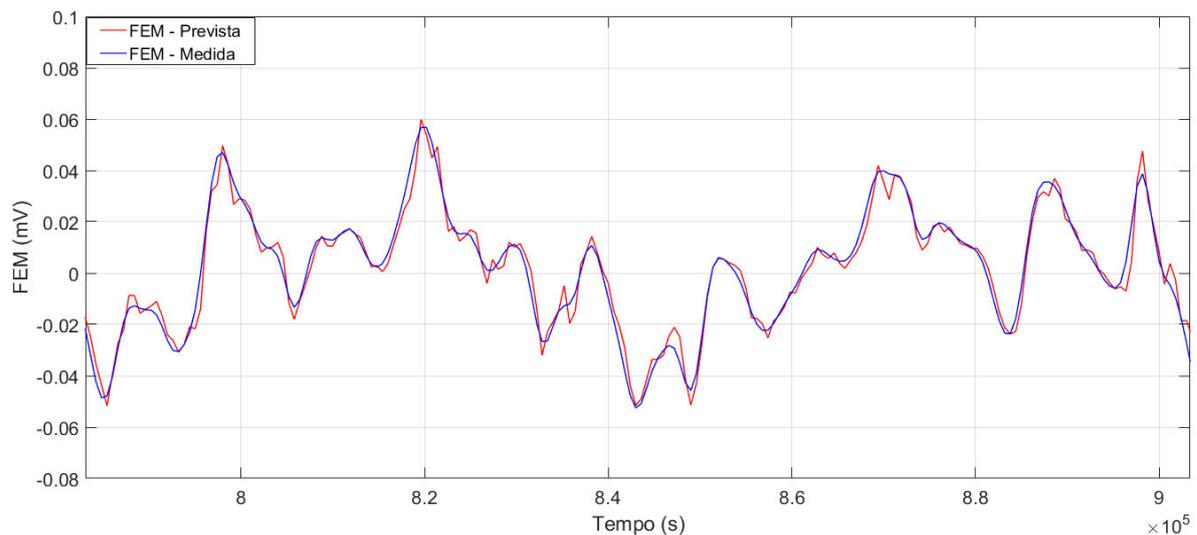


Figura 32: Gráfico AR (15) - FEM Medida e previsão para 3 passos à frente

Fonte: Autor

Com a modelagem e previsão do nível de líquidos já finalizados, partiu-se para a transformação do sinal da FEM (mV) para nível de líquidos (%). Para isso, tomou-se como base as oscilações mínimas e máximas do sinal ao decorrer de um longo período, usando o valor de -0,3 mV como o valor médio dos mínimos e 0,45 mV como sendo o valor médio dos máximos.

Posto isso, foi aplicada a seguinte fórmula de conversão de escala:

$$Nível = Nível_min + \frac{(Nível_max - Nível_min)}{(FEM_max - FEM_min)} \times (FEM - FEM_min) \quad (4.3)$$

Onde,

- *Nível* - Nível de líquidos (%);
- *FEM* - Força eletromotriz (mV);
- *Nível_min* - Valor mínimo do nível de líquidos (%);
- *Nível_max* - Valor máximo do nível de líquidos (%);
- *FEM_min* - Valor mínimo de FEM (mV);
- *FEM_max* - Valor máximo de FEM (mV).

Na [Tabela 3](#) podem ser observados os valores de máximo e mínimo das variáveis de entrada (*FEM*) e saída (*Nível*).

Tabela 3: Conversão de escala

Nível (%)	FEM (mV)
Max → 100	Max → 0,45
Min → 0	Min → -0,3

Substituindo os valores da [Tabela 3](#) na Eq. (4.3), temos a seguinte equação resultante para obter o valor do nível de líquidos (%) correspondente a medição de FEM (mV):

$$Nível = \frac{100}{0,75} \times (FEM + 0,3) \quad (4.4)$$

Sendo assim, utiliza-se os dados de FEM filtrada para realizar a conversão dos valores da medição dos sensores em nível de líquidos. Desse modo, tem-se o resultado final do processamento digital de sinal e da modelagem em porcentagem para análise e tomada de decisão na operação.

Por fim, esta informação foi disponibilizada de imediato para uso dos operadores da planta pois já apresentam informações importantes do processo, conforme pode ser visualizado na [Figura 33](#), que apresenta os furos-de-gusa que estão em operação e sua respectiva duração, além do nível de líquidos em porcentagem.

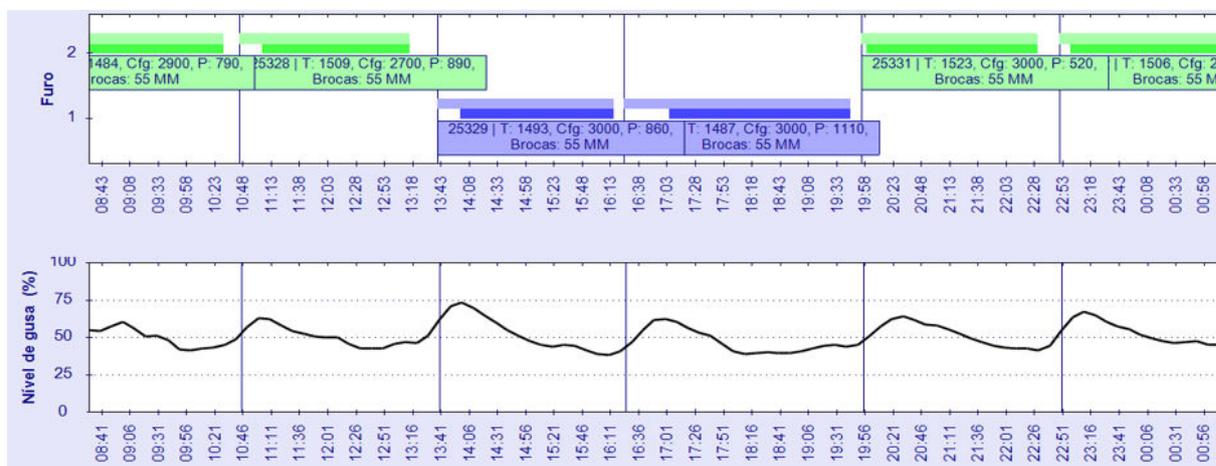


Figura 33: Sistema de monitoramento do nível de líquidos

Fonte: Autor

5 Conclusão

A análise e discussão dos resultados, deste trabalho, permitiram que fossem obtidas as seguintes conclusões:

- A partir do sinal filtrado, foi possível visualizar comportamentos do nível no interior do cadinho que antes não eram possíveis de serem observados;
- A modelagem do nível de líquidos permitiu que houvesse maior confiabilidade no sinal “puro” de FEM, demonstrando a real situação do cadinho e real nível de líquidos em seu interior;
- A predição do nível de líquidos do cadinho faz com que seja possível antecipar um atraso de escória, abertura de paralela, a vazão de esgotamento, ou seja, tem-se um recurso adicional para tomadas de decisão em situações de instabilidade operacional;
- Tem-se então um aumento da estabilidade operacional, propiciando um maior conhecimento e controle do nível dos líquidos no interior do cadinho do alto-forno, que é um importante parâmetro operacional.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Tem-se como sugestões para trabalhos futuros os seguintes itens:

- Utilização do modelo desenvolvido nesse trabalho em conjunto com redes neurais, com objetivo de aumentar a abrangência para outros fenômenos não avaliados pelo modelo e assim modelar e estimar com maior exatidão o nível de líquidos, assim como tornar a modelagem adaptativa;
- Estudo das variáveis de processo que possibilitem a previsão da temperatura de gusa juntamente com o nível de líquidos.

Referências

- AGUIRRE, L. A. *Introdução à identificação de sistemas—Técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2007. Citado 5 vezes nas páginas 30, 32, 34, 35 e 41.
- ARAÚJO, L. *Manual de Siderurgia, Produção*. [S.l.]: Editora São Paulo, Brasil: Arte & Ciência, 1997. Citado 5 vezes nas páginas 15, 16, 17, 18 e 19.
- BAER, W. *Siderurgia e desenvolvimento brasileiro*. [S.l.]: Zahar, 1970. Citado na página 15.
- BOASHASH, B. Note on the use of the wigner distribution for time-frequency signal analysis. *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, 1988. IEEE, v. 36, n. 9, p. 1518–1521, 1988. Citado na página 37.
- BUSSAB, W. d. O.; MORETTIN, P. A. *Estatística básica*. [S.l.]: Saraiva, 2010. Citado na página 30.
- CAMPOS, M. S. *Desvendando o minitab*. [S.l.]: Qualitymark Editora Ltda, 2003. Citado 2 vezes nas páginas 42 e 46.
- DOROFEEV, V.; NOVOKHATSKII, A. Origin of difference in electric potentials on blast furnace shell. *Steel USSR*, 1984. v. 14, n. 1, p. 10–12, 1984. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 26.
- DUBOVIK, V. et al. Automatic monitoring of the state of the blast furnace wall. *Izv. VUZ Chernaya Metall*, 1982. v. 4, p. 4–6, 1982. Citado na página 27.
- GAUSS, C. F.; DAVIS, C. H. *Theory of the motion of the heavenly bodies moving about the sun in conic sections*. [S.l.]: Courier Corporation, 2004. Citado na página 35.
- GEERDES, M.; CHAIGNEAU, R.; KURUNOV, I. *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction (2015)*. [S.l.]: Ios Press, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 22, 23 e 24.
- GOMES, F. S.; CÔCO, K. F.; SALLES, J. L. F. Multistep forecasting models of the liquid level in a blast furnace hearth. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 2017. IEEE, v. 14, n. 2, p. 1286–1296, 2017. Citado 4 vezes nas páginas 26, 27, 28 e 50.
- HAYKIN, S. S.; VEEN, B. V. *Sinais e sistemas*. [S.l.]: Bookman, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 39, 40 e 50.
- HSIA, T. C. System identification: least-squares methods. 1977. D. C. Heath and Company, 1977. Citado na página 35.
- HSU, H. P. *Análise de Fourier*. [S.l.]: Livros Tecnicos e Cientificos, 1973. Citado na página 38.

- LEBED, P.; SAFINA, L. Evaluating work of blast furnace hearth from nature of emf variation. *Steel in the USSR*, 1990. v. 20, n. 2, p. 59–61, 1990. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 46.
- LJUNG, L. System identification. In: *Signal analysis and prediction*. [S.l.]: Springer, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.
- MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C.; CALADO, V. *Estatística Aplicada E Probabilidade Para Engenheiros*. [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000. Citado na página 29.
- MORETTIN, P. A.; TOLOI, C. *Análise de séries temporais*. [S.l.]: Blucher, 2006. Citado na página 30.
- MOURÃO, M. B.; YOKOJI, A.; MALYNOWSKYJ, A. Introdução à siderurgia. *São Paulo: ABM*, 2007. 2007. Citado na página 20.
- OGATA, K.; SEVERO, B. *Engenharia de controle moderno*. [S.l.]: Prentice Hall do Brasil, 1998. Citado na página 32.
- PETERS, M. et al. Determination of the liquid level in the hearth of the blast furnace. In: *60 th Ironmaking Conference*. [S.l.: s.n.], 2001. p. 283–295. Citado na página 25.
- PRONIN, P. Variation in the electrical current voltage in the casting of blast furnace. *Izv. VUZ Chernaya Metall*, 1985. v. 5, p. 57–60, 1985. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 41.
- RADILOV, S. Electrical current in the blast furnace and its use for blast furnace monitoring. *Stal*, 1985. v. 3, p. 9–11, 1985. Citado na página 25.
- RIZZO, E. M. Introdução aos processos siderúrgicos. *São Paulo: ABM*, 2005. 2005. Citado na página 17.
- SPENCE, A.; PRITCHARD, W. Development of expert systems for blast furnace operation and control. *EUR(Luxembourg)*, 1997. Office for official publications of the European Communities, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 20.
- SYNRG. *Systems and Networking Research Group*. 2017. Acesso em: 30/07/2017. Disponível em: <<http://synrg.csl.illinois.edu/>>. Citado na página 38.
- TAVARES, R. Aerodinâmica e hidrodinâmica do alto-forno. *UFMG*, 2005. Universidade Federal de Minas Gerais, p. 84, 2005. Citado na página 21.
- TIAN, Y.-P. *Frequency-domain analysis and design of distributed control systems*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2012. Citado na página 48.
- ZADEH, L. A. Theory of filtering. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 1953. SIAM, v. 1, n. 1, p. 35–51, 1953. Citado na página 37.
- ZENG, J.-s.; GAO, C.-h.; SU, H.-y. Data-driven predictive control for blast furnace ironmaking process. *Computers & Chemical Engineering*, 2010. Elsevier, v. 34, n. 11, p. 1854–1862, 2010. Citado na página 19.