



Modelo computacional para análise do desempenho de um processo semicontínuo de distribuição de gás *Linz-Donawitz*

Computational model for the performance analysis of a semi-continuous process of Linz-Donawitz gas distribution

Cristina Weber Ambrósio¹
Luiz Bueno da Silva¹
Luiz Cláudio Monteiro Montenegro²

Resumo: A distribuição de gás *Linz-Donawitz* (LDG), coproduto do processo de produção do aço, para centrais termoeletricas, permite que a energia térmica recuperada seja convertida em energia elétrica, proporcionando benefícios econômicos e ambientais. Este artigo apresenta um modelo computacional baseado em simulação de eventos discretos para investigar o desempenho atual e em futuras expansões do processo semicontínuo de distribuição de gás LDG em uma siderúrgica. A simulação de diferentes cenários indicou que o aumento da demanda de gás recuperado é uma alternativa possível e economicamente viável. Uma redução de 66% na perda de gás é esperada com a inclusão de um novo consumidor que eleve a demanda do gás em 30%. Esta alternativa melhora também a flexibilidade do sistema em situações nas quais o principal consumidor falha ou precisa de uma parada para manutenção.

Palavras-chave: Simulação de sistemas de produção. Sistema de distribuição de gás. Mecanismo de desenvolvimento limpo.

Abstract: *The distribution of Linz-Donawitz gas (LDG), co-product of steelmaking process, among thermoelectric plants enables the conversion of the thermal energy recovered into electric energy providing economic and environmental profits. This paper presents a computational model, based on the discrete event simulation in order to investigate current performance of the semi-continuous gas distribution process in a steelmaking plant as well as its future performances due to production expansion. Different scenarios simulation indicated that an increase in the recovered gas demand is a possible and economically feasible alternative. A reduction of 66% in gas loss is expected with the inclusion of a new consumer that can increase gas demand by 30%. This alternative also improves the system flexibility in situations when the main consumer fails or needs a break or a maintenance interval.*

Keywords: *Production systems simulation. Gas distribution systems. Clean development mechanism.*

1 Introdução

A simulação computacional constitui uma importante técnica para o estudo de sistemas complexos. Para estes, o uso de métodos analíticos não permite prever o comportamento do sistema real. Nestes casos, o uso da simulação é indicado, pois permite modelar as características complexas do sistema, incluindo seus aspectos estocásticos e dinâmicos. Isto, sem tornar o modelo difícil de ser estudado (LAW; KELTON, 1991). A simulação prevê uma sequência de passos capazes de conduzir à análise do comportamento de um processo que se deseja conhecer com mais detalhes.

Devido à complexidade das operações envolvidas no processo de Distribuição do Gás LDG, a simples análise dos dados não é o mais adequado na prática. A informação levantada experimentalmente pode ser amplificada pelo uso da técnica de modelagem e simulação, a qual permite prever o desempenho do processo em condições ainda não realizadas experimentalmente. De acordo com Freitas (2001), a simulação projeta e experimenta um modelo computacional de um sistema real com o objetivo de entender seu comportamento ou avaliar estratégias para a sua operação.

¹ Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, Universidade Federal da Paraíba – UFP, CP 5045, Cidade Universitária, Bloco G, Centro de Tecnologia, João Pessoa – PB, Brasil, E-mails: cristina.weber@yahoo.com.br; bueno@ct.ufpb.br

² Departamento de Engenharia de Minas, Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Rua Espírito Santo, 35, sala 702, Centro, CEP 30160-030, Belo Horizonte – MG, Brasil, E-mail: lcmm@demin.ufmg.br

A simulação do sistema de distribuição de LDG pode conduzir não somente a ganhos operacionais, mas também a maiores benefícios ambientais, por meio da descoberta de alternativas que aumentem os índices de reutilização do gás. O gás LDG, coproduto da produção do aço, é recuperado e distribuído para as centrais termoeletricas por meio deste sistema, proporcionando a geração de energia elétrica e reduzindo os níveis de emissões atmosféricas.

O atual cenário da siderúrgica, na qual funciona o sistema em estudo, é de constantes expansões em todas as áreas de produção. Neste caso, o uso de ferramentas de auxílio à tomada de decisão se torna de grande valia. Franzese et al. (2005) utilizaram um modelo de simulação para a avaliação de cenários de produção e operação, devido à expansão de uma planta de produção de aço e de um sistema de correias transportadoras de matérias-primas.

O objetivo da utilização da simulação, neste contexto, é identificar a modelagem para o sistema semicontínuo de distribuição de LDG e permitir que se avalie o seu desempenho atual e futuro. Considerando-se possíveis alternativas ao processo, busca-se obter melhores níveis de utilização do gás, e, por conseguinte, a minimização das perdas.

2 Metodologia

Primeiramente, realizou-se uma pesquisa bibliográfica sobre conceitos básicos e metodologia de simulação de sistemas. Foram consultados na literatura científica disponível, trabalhos envolvendo a aplicação da técnica de simulação em processos da indústria primária, tais como o tratamento e transporte de minério e plantas siderúrgicas. Scarpe (1990) analisou a *performance* do sistema de produção do aço por meio da comparação de dois processos para a conformação do aço em placas: o lingotamento convencional e o contínuo. Carvalho (2003) simulou o comportamento contínuo do processo de transporte e concentração do minério de ferro por meio de simulação a eventos discretos. Desta forma, obteve-se o embasamento teórico necessário à elaboração do método a ser seguido durante a pesquisa.

O presente trabalho propõe a modelagem do Sistema de Distribuição de gás LDG por meio da simulação, considerando-se que o melhor modelo é o mais simples e capaz de responder aos objetivos com confiança adequada. As informações necessárias para o desenvolvimento do modelo, tais como os processos de chegada, atendimento, deslocamento entre as estações e os critérios de produção e qualidade foram determinados com a ajuda das pessoas diretamente envolvidas no processo. Os passos adotados no desenvolvimento do trabalho baseiam-se nos estudos de Law e Kelton (1991), igualmente utilizados nos casos pesquisados por Carvalho (2003) e Scarpe

(1990), nos quais a metodologia de simulação é descrita segundo o método científico, que compreende:

- formulação do problema e planejamento do estudo;
- coleta de dados;
- definição e validação do modelo conceitual;
- construção e verificação do programa computacional;
- realização de execuções piloto e validação do modelo programado;
- projeto dos experimentos e realização das execuções de simulação; e
- análise de resultados.

O programa de computador, usando como plataforma uma planilha eletrônica, foi desenvolvido de forma estruturada para viabilizar a entrada de dados no modelo, execução e análise dos resultados. O uso da planilha eletrônica como plataforma para o simulador permitiu o desenvolvimento rápido de um programa que pode ser compartilhado com a maioria dos computadores. O *software* de simulação Arena também foi utilizado para a simulação do modelo matemático desenvolvido. No Arena, a simulação é feita com entidades orientadas à simulação.

Decidiu-se pela utilização de um *software* de simulação de eventos discretos para a construção de um simulador capaz de analisar o desempenho do sistema de distribuição de LDG. A análise do desempenho foi feita a partir da avaliação do índice de aproveitamento de gás LDG, tanto na configuração atual quanto em possíveis alterações futuras, tais como variações nos níveis de geração e demanda de gás. Como o sistema em estudo é de natureza semicontínua, foi necessário discretizar o processo ou fluxo do gás, para que o *software* adotado pudesse ser utilizado. Fioroni et al. (2007) desenvolveram a simulação do transporte de minério de ferro, que é um processo de comportamento contínuo, por meio da discretização do fluxo do material, utilizando recursos de simulação discreta. De acordo com Fioroni et al. (2007), existe uma grande diferença entre o fluxo contínuo de material e porções deste material, mas se todo o material deixa o ponto inicial à mesma taxa e chega ao destino final ao mesmo tempo em ambos os casos, o resultado final será o mesmo.

3 Modelagem de sistemas contínuos e híbridos por meio da simulação de eventos discretos

A simulação contínua modela os sistemas de modo que as variáveis de estado se alteram continuamente ao longo do tempo. Em sistemas contínuos, suas principais atividades causam alterações suaves nos atributos das entidades do sistema. Nestes sistemas, o estado é geralmente definido como uma medida

de energia interna do sistema, tal como posição e velocidade (PRITCHETT et al., 2000).

Em geral, modelos de simulação contínua envolvem equações diferenciais, que estabelecem a taxa de variação da variável de estado, com relação ao tempo. Segundo Law e Kelton (1991), quando as equações diferenciais são simples, podem ser resolvidas analiticamente, gerando valores para as variáveis de estado ao longo do tempo, em função dos valores iniciais das variáveis de estado. Entretanto, nos casos em que a solução analítica não é possível, são utilizados métodos numéricos, tal como a integração Runge-Kutta, usada para integrar equações diferenciais numericamente.

Muitos sistemas complexos são mais adequadamente descritos por meio de modelos híbridos, ou seja, uma combinação de modelos contínuos no tempo e de eventos discretos, de acordo com Pritchett et al. (2000). Isto ocorre uma vez que existem sistemas que não são nem totalmente discretos nem totalmente contínuos, como é o caso do sistema em estudo, o que sugere a construção de modelos com características de simulação contínua e de eventos discretos, ou seja, modelos discreto-contínuos, ou híbridos.

3.1 Discretização de sistemas contínuos

Modelos contínuos e discretos diferem quanto à frequência em que o estado do sistema precisa ser atualizado, conforme Figura 1. Em modelos contínuos, os algoritmos de simulação aproximam a variação contínua por meio de atualizações em intervalos de tempo discretos, também conhecidos como *time-steps*. Tais intervalos de tempo devem ocorrer a uma taxa duas vezes maior do que a variável de interesse, de modo a capturar seu comportamento (PRITCHETT et al., 2000).

Modelos discretos não são necessariamente utilizados para a modelagem de sistemas discretos, assim como modelos contínuos não são necessariamente usados na modelagem de sistemas contínuos (LAW; KELTON, 1991). A decisão de se utilizar um modelo discreto ou contínuo depende dos objetivos do estudo e das características do sistema.

Segundo Pritchett et al. (2000), provou-se ser possível incorporar modelos discretos ou contínuos em *softwares* de simulação direcionados para um ou outro dentre estes dois tipos. Modelos contínuos, tais como o fluxo de materiais, podem ser discretizados, isto é, tratados como modelos discretos, após algumas suposições sobre as variáveis de estado (KUROKI et al., 2001). A Figura 2 ilustra como mudanças de nível de um fluido em um tanque podem ser simuladas no decorrer do tempo. Quanto menores os intervalos de discretização ou *time-slices*, mais precisa será a aproximação, porém, mais lenta será a simulação. Entretanto, notou-se também que este tipo de implementação requer que sejam estabelecidos pressupostos sobre o modelo, limitando sua precisão. Outra abordagem é a criação de *softwares* que aceitam de modo inerente modelos discretos e contínuos.

Carvalho (2003) e Fioroni et al. (2007) utilizaram-se da discretização de sistemas contínuos para a simulação e análise de desempenho de processos. Estes autores discretizaram o fluxo de materiais, tratando-o como uma série de 'porções', obtendo resultados estatisticamente similares ao comportamento do sistema real. O fluxo de gás LDG na simulação do processo de recuperação e distribuição foi tratado como uma sequência de porções de volume variável.

4 Sistema de Distribuição de Gás Linz-Donawitz

A empresa em que se encontra o sistema em estudo é uma usina siderúrgica integrada que contempla em seu fluxo de produção todas as etapas do processo siderúrgico. Tais etapas compreendem o recebimento de matérias-primas, transformação delas em ferro-gusa e posteriormente em aço, e as fases finais de conformação do aço em placas e bobinas. Neste processo, são gerados coprodutos tais como gases de processo que, uma vez reaproveitados na cogeração de energia, revertem em redução de custos para a empresa e na diminuição da poluição ambiental atmosférica.

O sistema de recuperação e distribuição de LDG foi concebido como parte de um planejamento estratégico que inclui a decisão corporativa de estabelecer um balanço entre as dimensões econômicas, sociais e

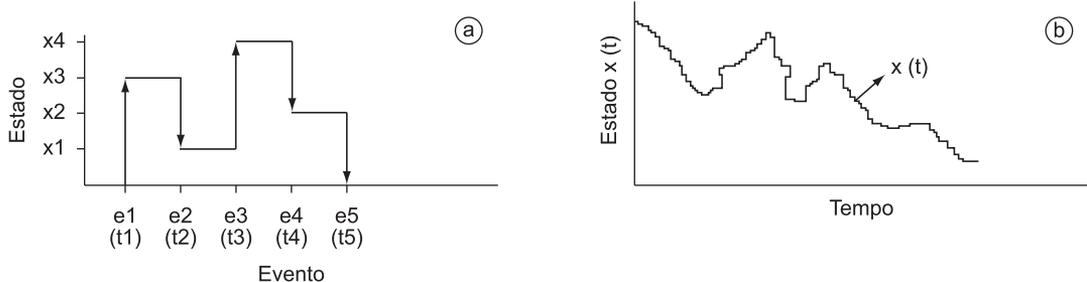


Figura 1. a) Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos discretos. b) Comportamento de uma variável de um sistema dinâmico de eventos contínuos. Fonte: Carvalho (2003).

ambientais, alinhado aos princípios de desenvolvimento sustentável. O sistema de distribuição de LDG compõe o projeto de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL) da empresa, em consonância com o conceito de Produção Limpa, cuja filosofia substitui o modelo *end-of-pipe*, de controle e tratamento apenas no interior da fábrica, por conceitos, estratégias e procedimentos que levam em conta a prevenção dos impactos à saúde e ao ambiente (FURTADO, J. S.; FURTADO, M. C., 2007).

O processo de recuperação e distribuição de gás de aciaria (LDG), representado na Figura 3, é bastante

dinâmico e apresenta variações contínuas em seu comportamento, com o decorrer do tempo. O sistema de distribuição de gás LDG deve operar de modo a aproveitar, da melhor forma possível, o gás LDG recuperado, que é destinado à geração de energia elétrica nas centrais termoeletricas (CTEs). O nível do gasômetro, que mede o volume ocupado pelo gás, é constantemente monitorado, de forma a permanecer entre os valores máximo e mínimo permitidos. Nas situações em que estes limites são excedidos, inviabiliza-se a recuperação e distribuição do LDG.

O LDG é recuperado durante o sopro de oxigênio nos convertedores, durante a produção de aço, conforme Figura 3. Desta forma, o gás é produzido em um processo de batelada, sempre que um ‘corrida’ ou produção de aço ocorre. O desafio é saber como utilizar o LDG para suprir outros processos que demandam um fluxo contínuo de combustível.

O gasômetro é um *buffer* ou ‘pulmão intermediário’, que sincroniza a geração e o consumo de gás. O operador do sistema de distribuição de gás monitora o nível do gasômetro com o objetivo de despachar o maior volume de gás recuperado possível. Por esta razão, são adotados procedimentos operacionais para se evitar níveis extremos, alto ou baixo, de ocupação do gasômetro. Dentre as quatro centrais termoeletricas

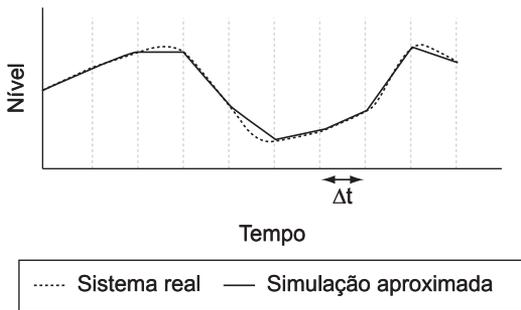


Figura 2. Aproximação discreta de um sistema contínuo. Fonte: Robinson (2004).

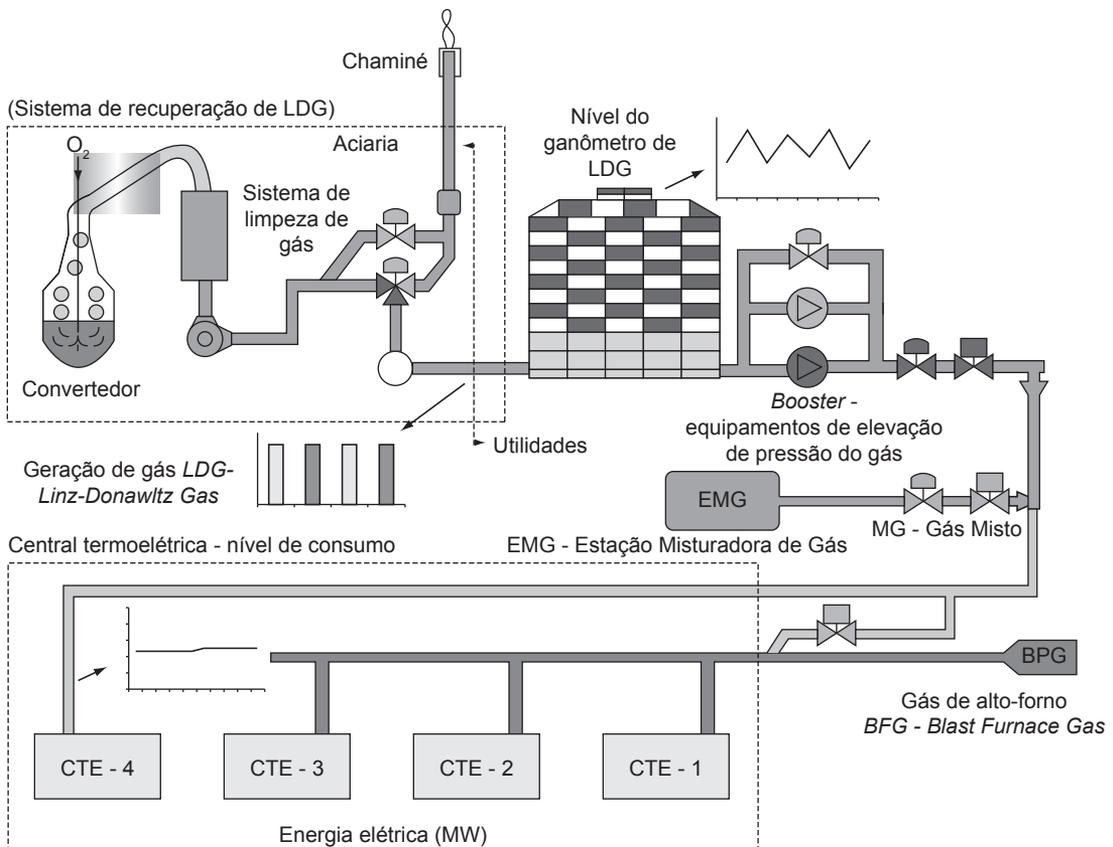


Figura 3. Sistema de Geração e Distribuição de gás LDG.

existentes, a quarta é a principal consumidora de gás LDG e requer um fluxo de gás constante por razões operacionais. Então, variações instantâneas na disponibilidade de gás são absorvidas por outra tubulação de fornecimento de gás, evitando a perda de gás de aciaria por nível alto do gasômetro, como mostra a Figura 4.

A proposta deste trabalho é a construção de uma ferramenta computacional que permita a análise virtual da configuração atual e de futuros cenários do sistema de distribuição de gás LDG, respaldada por uma base estatística de dados. Desta forma, busca-se tornar mais ágil e segura a tomada de decisões, sem a necessidade de interferências no processo. Para a construção da ferramenta, será utilizada uma planilha eletrônica e a versão estudante do pacote de simulação Arena.

5. Modelagem do sistema de distribuição de Linz-Donawitz utilizando simulação

O estudo de caso deste trabalho se baseia no Sistema de Distribuição de LDG previamente descrito. Como se pode constatar, trata-se de um sistema cujo valor das variáveis se altera continuamente no tempo e cujo comportamento apresenta-se dinâmico e complexo. A tomada de decisão referente ao aperfeiçoamento e evolução de sistemas desta natureza exige uma análise elaborada. Decisões baseadas apenas na experiência operacional podem negligenciar aspectos fundamentais ao desempenho do processo. Outro fator que dificulta a tomada de decisão sobre o processo em estudo é o fato de ser este um sistema que funciona ininterruptamente, exceto por motivo de falha ou parada programada. Desta forma, a realização de testes com o sistema se torna inviável.

5.1 Definição do modelo conceitual

Após o planejamento do estudo, o processo de distribuição de LDG foi avaliado, o que incluiu longos períodos de observação da operação e comportamento do processo real, entrevistas com especialistas e operadores do sistema e consulta a documentos relativos ao processo. Este estudo propiciou a elaboração de um modelo conceitual do sistema, conforme apresentado anteriormente no fluxograma simplificado da Figura 4. A validação do modelo conceitual foi feita por meio de uma avaliação detalhada, em conjunto com especialistas do sistema. O objetivo foi verificar as suposições feitas, de modo a garantir a veracidade do modelo. Esta etapa foi fundamental para a continuidade do projeto, uma vez que o sistema é regido por algumas expressões que são determinantes para o seu funcionamento. Tais expressões são embutidas nas malhas de controle do sistema, e devem ser representadas no modelo

da forma mais fiel possível à realidade, de maneira a garantir sua validade.

A Equação 1, a seguir, constitui a principal regra de controle do sistema, que determina a vazão visada de envio de gás LDG do gasômetro para os consumidores. Com isto, o sistema de controle visa manter o nível de LDG no gasômetro de forma a minimizar a ocorrência de perdas de recuperação de gás por volume alto ou a falta de gás para envio contínuo para a CTE 4, principal consumidor do gás.

$$Q_{vis} = k1 * k2 * Q_{média} \tag{1}$$

em que:

Q_{vis} = vazão visada de LDG;

$Q_{média}$ = vazão média de LDG;

$k1$ = fator de segurança;

$k2$ = fator de controle de nível do gasômetro; e

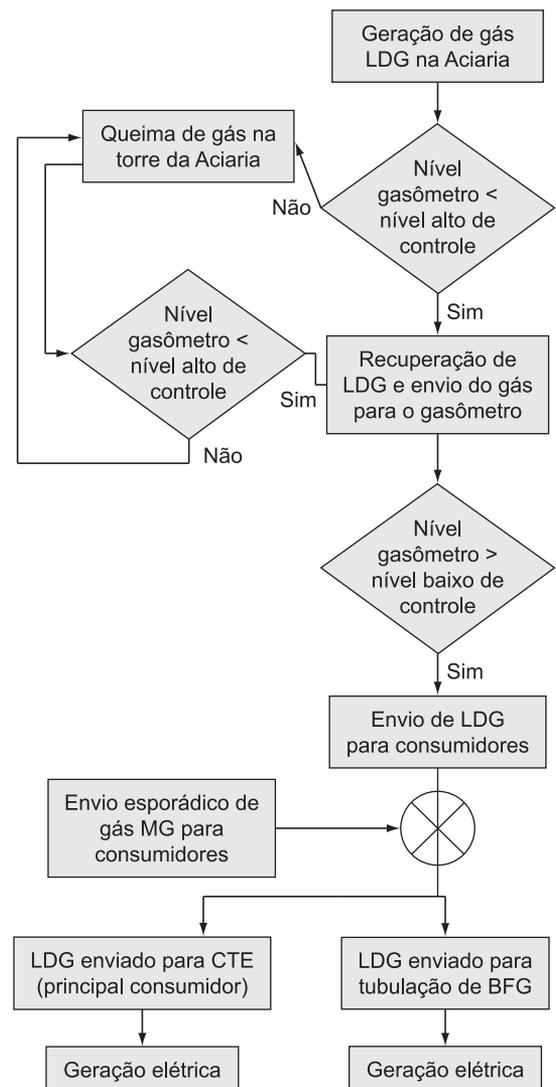


Figura 4. Fluxograma do Sistema de Recuperação e Distribuição de LDG.

$k2 = 1 +$ desvio (nível visado do gasômetro; nível medido do gasômetro).

Além da equação de controle de vazão visada, foram considerados também os limites operacionais máximo e mínimo de capacidade do gasômetro, as vazões de operação do *booster* (equipamento de elevação da pressão do gás para envio aos consumidores) e a taxa máxima de absorção do gás LDG pela tubulação de gás BFG.

5.2 Coleta e tratamento de dados

A etapa de coleta e tratamento de dados começou logo após as definições iniciais do modelo conceitual. A coleta de dados se baseou nas informações dos sistemas de automação dos processos de distribuição e geração do gás LDG. Os dados coletados nesta fase se referem aos anos de 2006 e 2007. Estes dados foram tratados e analisados estatisticamente com o auxílio da ferramenta *Input Analyzer*, do pacote Arena versão estudante.

A frequência da coleta de dados foi de minuto a minuto, uma vez que esta era a menor frequência na qual os dados estavam disponíveis. Optou-se por fazer duas coletas por um período de um mês, espaçadas por doze meses. Desta forma, foi possível observar a tendência de aumento de geração de gás. Na Tabela 1 é evidenciado o aumento de produção e distribuição do gás. No entanto, o aumento da geração ocorre em proporção maior que o do consumo, o que fica comprovado pelo acréscimo da perda do gás. Esta tendência, conforme especialistas da aciaria, tende a permanecer, devido a projetos de expansão da produção.

Em seguida, passou-se à determinação das distribuições de probabilidade que melhor representassem o processo de geração do gás LDG. Por meio do *Input Analyzer*, foram identificadas as curvas que mais se assemelhavam ao perfil de volume e período de duração da recuperação de gás, bem como ao intervalo entre as ocorrências destas recuperações. Para isto, foram considerados os resultados dos testes de aderência das distribuições encontradas.

Na Figura 5, observa-se o resultado obtido para os dados coletados em agosto de 2007 para os tempos entre corridas. É apresentado o histograma dos dados reais e a curva de distribuição mais adequada, assim como os resultados dos testes de aderência e o p-valor correspondente. De acordo com Morettin e Bussab

(2006), p-valores menores que 0,05 indicam que devemos rejeitar a hipótese nula de que a distribuição encontrada é representativa dos dados coletados. Para p-valores maiores que 0,10, pode-se dizer não somente que não se pode rejeitar a hipótese nula como também que a distribuição teórica proposta é confiável.

5.3 Construção do modelo computacional

Para facilitar a concepção do modelo e sua tradução para uma ferramenta de simulação, o sistema foi decomposto em subsistemas, conforme mostra a Figura 6.

Cada subsistema compreende regras lógicas de controle de fluxo de LDG. Baseando-se no diagrama de blocos da Figura 6, foram identificados os submodelos ou grupos de lógicas de controle a serem construídos:

- lógica de geração e recuperação de LDG;
- lógica de fluxo de distribuição de LDG;
- lógica de demanda de LDG; e
- lógica auxiliar de cálculo de vazão média de LDG recuperado.

Em linhas gerais, discretizar o fluxo de gás foi a principal decisão tomada durante a construção do simulador. A discretização de todo o fluxo foi feita no tempo, em intervalos de um minuto. Esta também

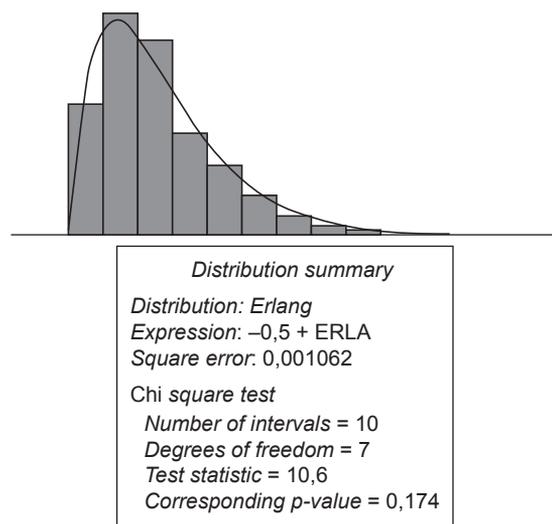


Figura 5. Análise da distribuição de probabilidade para tempos entre corridas (períodos entre geração de gás).

Tabela 1. Parâmetros de geração e consumo de LDG nos meses de julho de 2006 e agosto de 2007.

Parâmetros do Sistema de Distribuição	Julho/2006	Agosto/2007
Volume médio de geração de gás por minuto (Nm ³ /minuto)	2351.50	2477.10
Volume total de LDG consumido (Nm ³)	35166681.91	40385398.16
Perda de LDG por corrida (Nm ³)	4539.19	5323.29

foi a frequência de coleta de dados do sistema. Para cada submodelo ou lógica de controle, foi definida a figura da entidade controladora, que é criada uma única vez, ativando a simulação, e que circula pelo submodelo, a cada minuto, durante todo o tempo de simulação. A entidade controladora se move pela lógica do modelo, sendo diretamente influenciada por esta mesma lógica. Isto ocorre por meio da modificação de alguns dos atributos das entidades, sensíveis às expressões do modelo. Paralelamente, as variáveis de estado do sistema são influenciadas pelas alterações sofridas pelas entidades.

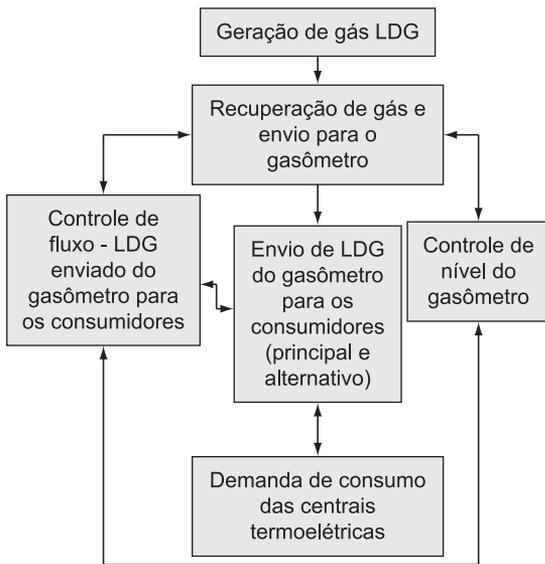


Figura 6. Diagrama de blocos para identificação de sub-sistemas.

Exemplificando o processo de discretização, inicia-se pela entidade controladora de geração e recuperação de gás. O atributo de volume gerado a cada minuto segue a curva probabilística de geração de gás definida para o modelo, conforme obtido na etapa de tratamento de dados. A variável de estado de nível do gasômetro é diretamente influenciada pelo atributo de volume da entidade de geração, que “transfere” este volume para o gasômetro, a cada minuto. A lógica de controle de geração, baseada nos parâmetros e regras de operação reais, define se de fato haverá esta recuperação de gás ou se o gás deverá ser queimado, por insuficiência de espaço livre no gasômetro. Na Figura 7 é mostrado um trecho da lógica de controle de geração de gás.

Para a discretização da distribuição de LDG, a entidade controladora de distribuição tem seu atributo de volume ou vazão de gás alterado dinamicamente, conforme as circunstâncias de disponibilidade de gás no gasômetro, demanda dos consumidores e expressões de controle que regem a operação de distribuição, tal como a função de cálculo de vazão visada de distribuição de gás. A entidade, por meio do atributo de vazão, retira ‘porções’ de LDG do gasômetro e as “transfere” para os consumidores, gerando o fluxo de distribuição, conforme Figura 8. Este fluxo altera o estado do sistema, esvaziando o *buffer* intermediário de armazenamento e incrementando o volume de gás enviado para as centrais termoeletricas.

A lógica do sistema foi construída considerando-se as restrições e procedimentos operacionais, os quais foram modelados por meio de blocos lógicos, lógica booleana e expressões do Arena. Tais expressões são constantemente atualizadas, tornando a lógica de

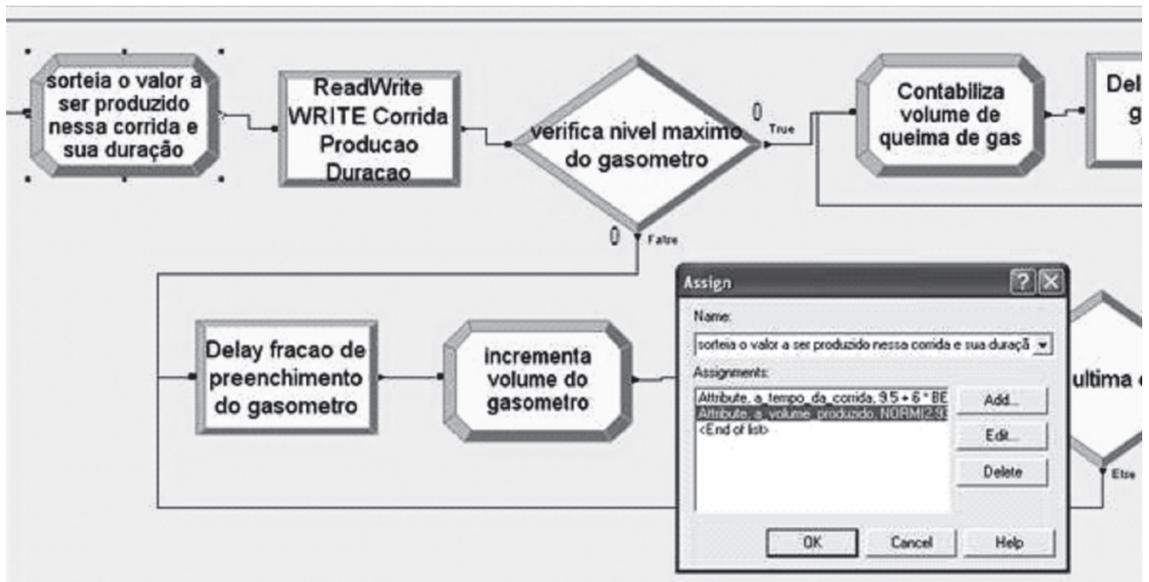


Figura 7. Discretização do fluxo de geração de gás LDG durante as corridas de produção do aço.

controle sensível às variáveis de estado do processo, que é o que ocorre no sistema real. Os parâmetros operacionais do sistema foram modelados por um conjunto de variáveis, de maneira que, durante a validação e experimentação do modelo, fosse possível a alteração de tais parâmetros, conforme a configuração do sistema e cenário a ser simulado.

Para indicador de desempenho, a ser utilizado na tomada de decisão dos cenários simulados, foi definida a variável de volume de queima de gás LDG. Por meio do montante de gás queimado por insuficiência de espaço no gasômetro, pode-se medir o desempenho do sistema, cujo principal objetivo é distribuir todo o gás recuperável gerado.

6 Validação do modelo computacional

Validar um modelo significa assegurar que os resultados obtidos pelo modelo são próximos aos observados no sistema real (JAIN, 1991). Segundo Jain (1991), a comparação com o sistema real é o método mais confiável e preferível para validar o modelo de simulação. Foi adotada como forma de validação do modelo construído a comparação dos resultados da simulação com os resultados históricos coletados.

Para a escolha do período de simulação, optou-se por um longo período de simulação, para que fosse eliminada a influência do período transiente inicial (JAIN, 1991) e para que se obtivesse uma quantidade de dados de saída suficientes para a obtenção de resultados acurados (ROBINSON, 2004). Desta

forma, assegura-se que as condições iniciais não afetarão os resultados.

A etapa de validação iniciou com a simulação do modelo utilizando-se dados históricos de produção de LDG no período de 01/07/2006 a 31/07/2006. O comportamento do nível do gasômetro obtido pela simulação foi comparado aos dados históricos deste período. Os dados de geração foram lidos a partir de arquivos texto e armazenados pelas entidades controladoras de geração, nos atributos de volume.

O mesmo procedimento adotado para o mês de julho de 2006 foi realizado para o período de 01/12/2006 a 31/12/2006, de modo a verificar que o modelo continuava válido, mesmo com um aumento do ritmo de geração de gás. Outro procedimento utilizado na validação foi simular o processo de distribuição de gás no Excel, baseando-se nas mesmas premissas e regras de operação consideradas na simulação no Arena.

Como se pode notar na Figura 9, o resultado do comportamento do nível do gasômetro simulado pelo Excel e Arena foi bem próximo, sendo que ambos os simuladores se comportaram de modo semelhante ao sistema real.

Na Figura 9, está representado o nível real do gasômetro, assim como o nível simulado no Arena e no Excel. Também é apresentada a diferença entre o nível real e simulado no Arena. A diferença média encontrada foi de 4,9%. A diferença obtida entre a simulação no Excel e no Arena ficou, na média, em 1,5%. As demais linhas representam os instantes e volumes de recuperação de gás. O resultado pode ser considerado bastante satisfatório, devido à grande

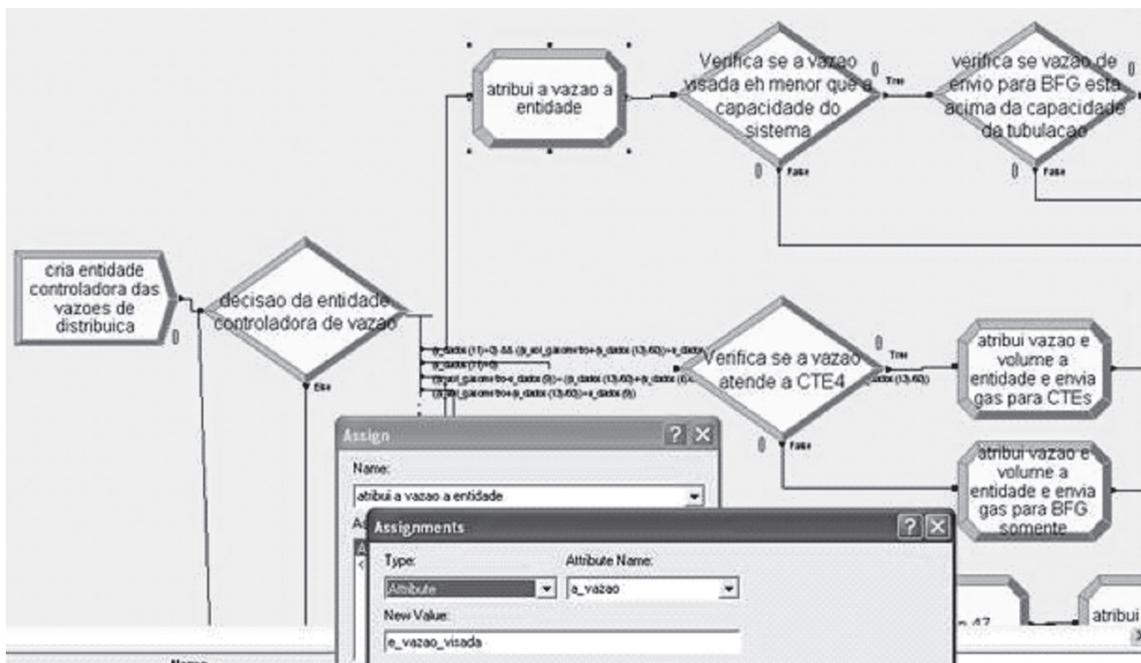


Figura 8. Trecho da lógica de discretização do fluxo de distribuição de gás LDG.

variabilidade apresentada pela variável de nível e ao longo período de simulação considerado, de 43200 minutos.

Para a confirmação da validação do modelo, foram construídos gráficos comparativos entre o volume real e o volume simulado no Excel e no Arena, do qual se obteve o coeficiente de correlação $R^2 = 0,9835$ e $R^2 = 0,9629$, respectivamente, o que mostra que os dados reais e simulados possuem uma forte correlação. Estes gráficos são mostrados na Figura 10 a seguir. Após esta etapa, considerou-se o modelo desenvolvido validado para representar o sistema de distribuição de gás LDG.

7 Experimentação e análise de cenários

De acordo com Freitas (2001), pela experimentação é possível determinar como o comportamento de um sistema pode ser influenciado pelos possíveis valores de uma ou mais variáveis, conhecidas, nestes casos, como fatores. Um experimento é um teste ou uma série de testes nos quais são realizadas alterações controladas sobre os fatores de um processo, de forma a avaliar o impacto destas alterações nas variáveis de desempenho ou resposta.

A abordagem de projeto de experimentos identifica os fatores que possuem maiores chances de proporcionar melhorias no processo (ROBINSON, 2004). Para o sistema em estudo, foram definidos como fatores a capacidade do gasômetro e a demanda de gás LDG, uma vez que o indicador de desempenho é diretamente afetado por estes fatores. Partiu-se do cenário I, correspondente à configuração atual do sistema. Em seguida, foram simulados os cenários II

e III, correspondendo a variações nos níveis de capacidade de armazenamento e demanda de gás LDG.

7.1 Projeto de experimentos

O projeto de experimentos especifica a estratégia que determina o número de experimentos a serem realizados, bem como o número de replicações dos experimentos. Cada experimento representa uma combinação entre um fator e um de seus níveis. O projeto experimental adotado foi o projeto conhecido como um fator por vez. Nesta abordagem, como o próprio nome indica, varia-se um fator por vez, mantendo-se os demais fixos (FREITAS, 2001). Esta estratégia também é conhecida como projeto experimental simples.

O projeto experimental adotado manteve, para o período de simulação, o mesmo período de um mês, em intervalos de minuto, da mesma forma que na fase de validação do modelo. Optou-se por variar os dois fatores definidos (capacidade de armazenamento e demanda de gás) em pelo menos três níveis, por meio da realização de 6 experimentos, conforme apresentado na Tabela 2. O sinal '+' indica que o fator participa do experimento, enquanto o sinal '-' significa que tal fator não foi considerado.

7.2 Simulação dos cenários

O cenário I corresponde à simulação do sistema em sua configuração original. O objetivo deste cenário é determinar o atual volume de perda de gás. Utilizando-se o modelo validado, a variável de volume de queima de gás foi avaliada considerando-se os ritmos de geração observados em julho de 2006

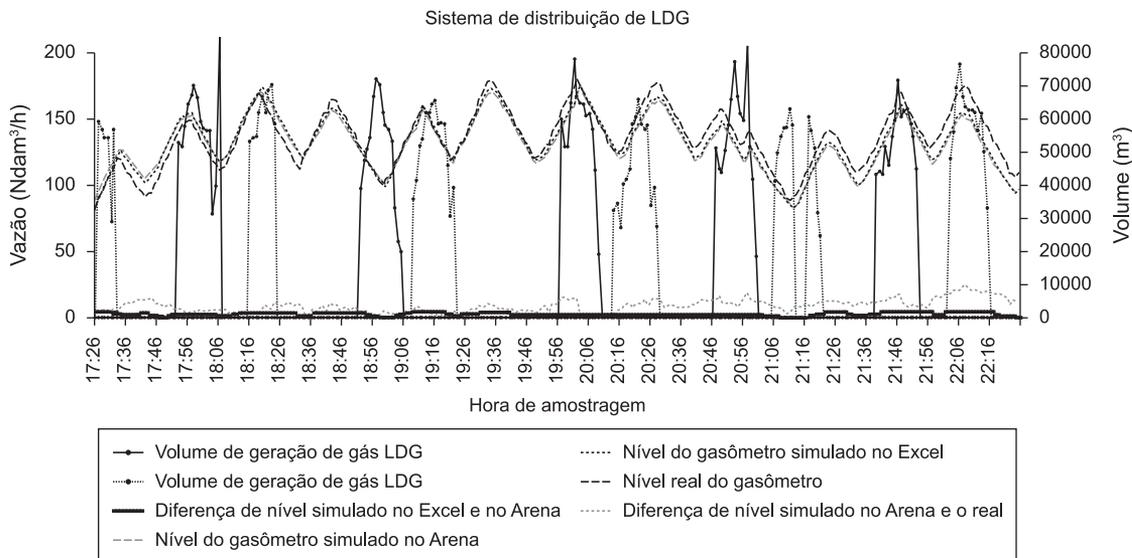


Figura 9. Comportamento real e simulado, no Arena e Excel, do nível do gasômetro em dezembro de 2006.

e agosto de 2007. Os resultados encontrados foram 6.464.914 Nm³ e 7.269.228 Nm³, respectivamente.

O resultado apresentado no cenário I aponta para uma análise da adequação da capacidade do gasômetro como *buffer* intermediário entre produção e consumo do processo de distribuição de LDG. O cenário II simulado visou à avaliação do comportamento do sistema em relação ao volume de queima, por meio da variação da capacidade do gasômetro. A capacidade do gasômetro é o primeiro fator de experimentação. Na Tabela 3 são apresentados os níveis de variação para este fator, bem como sua influência sobre a perda de gás.

O cenário III avaliou o comportamento do sistema pelo mesmo indicador de desempenho, pela variação da demanda de gás pelos consumidores. A avaliação deste segundo fator foi motivada pelo indicativo de volume de gás desperdiçado, observado por meio do cenário I. Considerando-se o volume de gás não aproveitado pela configuração atual do sistema,

optou-se por simular o aumento de demanda pela adição de um novo consumidor no sistema. Com base em perfis de consumo de fornos consumidores de gases de composição semelhante ao LDG, em operação na mesma usina, foram planejados experimentos nos quais a demanda de gás do novo consumidor fosse variada de 12.000 a 22.000 Nm³/h. A Tabela 4 apresenta os níveis considerados para o fator demanda e sua influência sobre a perda de gás.

7.3 Análise dos resultados

Analisando-se o volume de perda de gás no cenário I, observa-se que o volume desperdiçado é considerável. De acordo com dados do sistema de recuperação, a queima de gás recuperável durante a produção do mês de julho de 2006 corresponde, em média, a 3 dos 13 minutos médios de recuperação de gás LDG. A perda do gás aumenta em 12% quando se considera o mês de agosto de 2007. Estes resultados justificam a necessidade de um estudo sobre alternativas de operação do sistema de modo a aumentar o índice de aproveitamento de LDG.

Os resultados obtidos no cenário II, mostrados na Tabela 3, apresentam uma forte tendência de redução do volume de queima de gás à medida que a capacidade do gasômetro aumenta. Isto se deve ao fato do gasômetro ir se tornando cada vez mais capaz de absorver a taxa de geração de gás (120.000 Nm³/h), visto que esta taxa, nos períodos de geração, é superior à taxa de consumo ou demanda total dos consumidores, que é de no máximo, 70.000 Nm³/h. Pela coleta de dados e informações fornecidas por especialistas no processo, tinha-se um indicativo de que o gasômetro fosse o gargalo, para os níveis atuais de demanda. Por meio da experimentação do cenário II, esta expectativa foi confirmada. A escolha dos níveis de aumento de capacidade foi arbitrária, partindo de incrementos menores (12,5% e 25%) até aumentos de 50%. Vale ressaltar que a expansão de capacidade do gasômetro é um cenário hipotético, uma vez que o gasômetro não pode ser facilmente expandido, por razões práticas e econômicas. De qualquer modo, este cenário é útil na determinação de capacidades mais adequadas para o gasômetro.

No cenário III, foi possível verificar, por meio dos experimentos, que a adição de mais um consumidor de gás é possível. A perda de gás, conforme observado na Tabela 4, foi reduzida cada vez mais, na medida em que se aumentavam os níveis de demanda do novo consumidor. Os níveis de demanda simulados são possibilidades reais e estão sendo considerados em estudos de expansão do processo de distribuição de LDG. É importante ressaltar que, no último nível de variação de demanda, obteve-se 66% de redução no volume de perda de gás, valor bem próximo ao

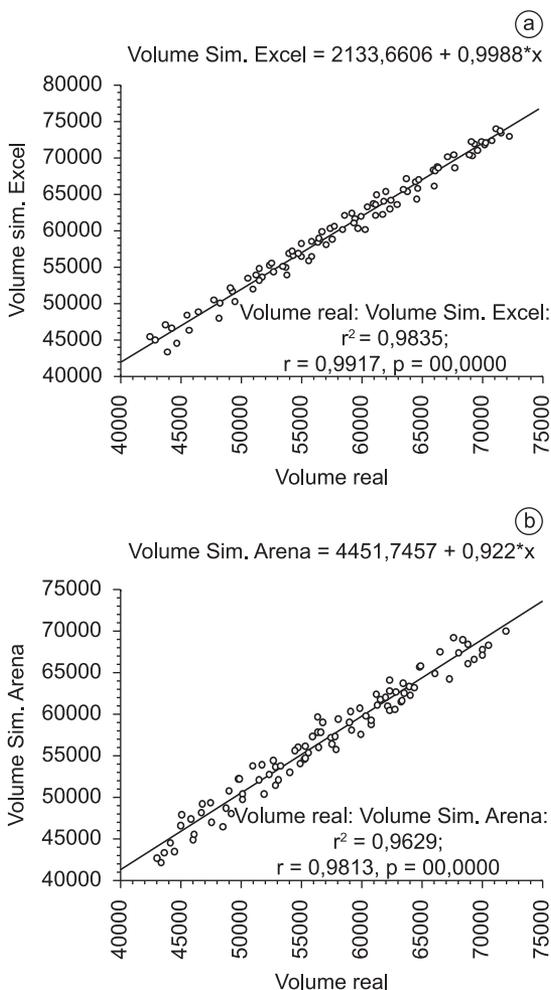


Figura 10. Correlação entre o volume ocupado do gasômetro real e simulado no a) Excel e no b) Arena.

alcançado na simulação do oitavo experimento de aumento de capacidade do gasômetro, que foi de 67%.

Pela análise dos cenários considerados, as reduções de perda foram mais significativas nos primeiros níveis de acréscimo de capacidade ou demanda de gás. Uma análise mais detalhada das variáveis indica que isto ocorre devido a alguns períodos de tempo durante os quais o principal consumidor reduz sua demanda por motivos operacionais. Uma vez que a geração de gás continua em ritmo normal, pois a produção de aço resulta no principal produto da empresa, o gasômetro atinge seu nível superior de operação. Nestas condições, é difícil evitar a perda de gás, mesmo com capacidades ou demandas maiores.

Tabela 2. Definição inicial dos experimentos do projeto.

Experimento	Aumento de capacidade de armazenamento do gasômetro	Aumento da demanda de gás LDG
1	+	-
2	+	-
3	+	-
4	-	+
5	-	+
6	-	+

Tabela 3. Resultado dos experimentos realizados no cenário II.

Experimento	Aumento de capacidade de armazenamento do gasômetro (%)	Redução da perda de gás LDG (%)
1	0.00	0.00
2	12.50	19.16
3	25.00	29.30
4	50.00	43.19
5	75.00	50.78
6	100.00	53.42
7	150.00	59.00
8	200.00	61.65
9	300.00	66.52

Tabela 4. Resultado dos experimentos realizados no cenário III.

Experimento	Aumento da demanda por gás LDG (Nm ³)	Redução da perda de gás LDG (%)
1	0.00	0.00
2	12000.00	44.00
3	14000.00	48.00
4	15000.00	54.00
5	22000.00	66.00

8 Conclusões

Após a análise das informações geradas nas simulações da etapa de validação e dos cenários I, II e III, e com base no ritmo de geração crescente de LDG, quando da avaliação das produções de 2006 e 2007, pode-se concluir que a capacidade do gasômetro é insuficiente para absorver o ritmo atual e futuro de produção, considerando-se a atual demanda de gás LDG. Pode-se também concluir que a adição de mais um consumidor é viável e recomendada, haja vista a redução considerável de perda de gás decorrente deste cenário.

Ao se analisar os resultados em cada cenário, observam-se índices semelhantes de redução de perda de gás, considerando-se o aumento de capacidade do gasômetro e a inclusão de um novo consumidor. No entanto, adicionar um novo consumidor é uma opção realista e economicamente viável. Esta alternativa também melhora a flexibilidade do sistema em situações nas quais o principal consumidor falha ou precisa de uma parada para manutenção.

Além de vantagens econômicas, existem vantagens ambientais importantes, advindas da redução indireta da queima de gases. O gás que antes era apenas queimado após sua geração pelo processo de produção de aço, agora passou a ser convertido em energia elétrica. Desta forma, evita-se a necessidade de geração desta mesma energia por outras fontes, seja a combustão de outros coprodutos seja a exploração de recursos naturais. A empresa em estudo aderiu a iniciativas conhecidas por 'mecanismos de desenvolvimento limpo', como é o caso do processo de reutilização do gás LDG. Por consequência, a empresa passa a ser detentora de créditos de carbono, na medida em que reduz as emissões de gases poluidores. Soma-se a isto o fato positivo da redução dos efeitos nocivos causados ao meio-ambiente.

Análises tais como as anteriores mostram que, com a construção do simulador, foi possível avaliar o desempenho do sistema de distribuição de gás LDG. A metodologia também se mostrou útil para a tomada de decisão sobre futuras expansões, sendo capaz de avaliar impactos sobre o sistema estudado devido ao aumento de demanda e capacidade. Esta contribuição é também de interesse para a sociedade em geral, uma vez que auxilia na melhoria do desempenho de um processo referente à redução de emissões atmosféricas. Por fim, este estudo acrescenta conhecimento sobre a simulação de processos contínuos em usinas siderúrgicas, onde este tipo de processo ocorre com frequência. Em especial, a pesquisa apresenta certo ineditismo, visto que são poucas as ocorrências de trabalhos acadêmicos envolvendo simulação de processos da área de utilidades da siderurgia.

Referências

- CARVALHO, D. T. **Metodologia de análise do desempenho da usina de concentração da samarco mineração S.A. baseada em simulação das operações**. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2003.
- FIORONI, M. et al. Simulation of continuous behavior using discrete tools: ore conveyor transport. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2007, Washington, DC. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org.htm>>. Acesso em: 13 jul. 2007.
- FRANZESE, L. A. et al. Simulation based decision for steelmaking operations challenges. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2005, Washington, DC. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org>>. Acesso em: 16 jul. 2006.
- FREITAS FILHO, P. J. **Introdução à modelagem e simulação de sistemas**: com aplicações em arena. Florianópolis: Visual Books, 2001.
- FURTADO, J. S.; FURTADO, M. C. **Gestão de operações**: a engenharia de produção a serviço da modernização da empresa. São Paulo: Edgard Blücher, 1997.
- JAIN, R. **The Art of computer system performance analysis**: techniques for experimental design simulation and modeling. New York: John Wiley & Sons, 1991.
- KUO, S. et al. Modeling continuous flow with discrete-event simulation. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2001, Arlington. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org.htm>>. Acesso em: 27 maio 2005.
- LAW, A. M.; KELTON, W. D. **Simulation modelling and analysis**. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1991.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística básica**. 5 ed. São Paulo: Saraiva, 2006.
- PRITCHETT, A. R. et al. Hybrid-System simulation for national airspace system safety analysis. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, 2000, Orlando. **Proceedings...** Disponível em: <<http://www.wintersim.org.htm>>. Acesso em: 29 maio 2005.
- ROBINSON, S. **Simulation**: the practice of model development and use. England: John Wiley & Sons, 2004.
- SCARPE, A. **Análise do desempenho operacional de um sistema de produção de aço com lingotamento convencional e contínuo**. 1990. Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1990.