

REDUÇÃO DE ERROS DE BALANÇOS DE UTILIDADES FLUIDAS¹

*Bruno Bueckmann Diegoli²
Fernando Dummer Silva³
Valter Barbosa de Oliveira Junior³*

Resumo

Com as sucessivas expansões da ArcelorMittal Tubarão, ocorreram mudanças no ritmo operacional da usina. Em contrapartida, notou-se que os erros nos balanços de massa das utilidades fluidas aumentaram significativamente. As quantidades de combustíveis que compõem o erro nos balanços representam insumos que deixam de ser contabilizados adequadamente nas unidades operacionais. Valores corretos das medições e dos balanços de massa são fundamentais para tomada de decisões, para cálculos de rendimento e otimizações das produções, com vista à redução de custos. Este artigo fornece uma descrição geral de ações realizadas para reduzir a média dos erros absolutos dos balanços de volume dos gases combustíveis BFG (Gás de Alto Forno) e COG (Gás de Coqueria), cuja distribuição é gerenciada pela Área de Utilidades na usina siderúrgica ArcelorMittal Tubarão.

Palavras-chave: Balanço de volume; Gás; Medição de vazão; Utilidades.

REDUCTION OF FLUID UTILITIES BALANCE ERROR

Abstract

With the successive expansions of ArcelorMittal Tubarão, some operational changes occurred. However, it was noted that errors in the mass balance of the fluid utilities increased significantly. The amount of fuels that establishes the balance errors represent resources which are no longer accounting adequately in operational units. Correct values of measurements and mass balances are fundamental for decision making, efficiency calculation and improvements in production, aiming to reduce costs. This article provides an overview of actions taken to reduce the average absolute errors of volume balances, applied to the fuel gases BFG (Blast Furnace Gas) and COG (Coke Oven Gas), whose distribution is managed by the Utilities Area of ArcelorMittal Tubarão steel plant.

Key words: Volume balance; Gas; Flow measurement; Utilities.

¹ *Contribuição técnica ao 13º Seminário de Automação de Processos, 7 a 9 de outubro de 2009, São Paulo, SP.*

² *Engenheiro de Controle e Automação, Especialista de Automação da ArcelorMittal Tubarão (ArcelorMittal Brasil).*

³ *Engenheiro Eletricista, Especialista de Automação da ArcelorMittal Tubarão (ArcelorMittal Brasil).*

1 INTRODUÇÃO

A grande oferta de sistemas de controle digital, tipo CLP¹ e SDCD² a partir da década de 90 e os grandes avanços na área de informática nos disponibilizaram recursos para a aquisição e análise de dados de forma rápida. Apesar disso, gerenciar a estocagem e o consumo de combustíveis numa usina siderúrgica não é uma tarefa fácil, devido principalmente à existência de diversos produtores e consumidores, com diferentes perfis.

Outra dificuldade frequentemente encontrada é o fechamento do balanço de massa ou de volume de combustíveis distribuídos, que pode ser prejudicado por vários fatores, tais como: erros de medição, falha na transmissão de dados, ausência de medição, vazamentos etc.

De modo geral, numa usina siderúrgica integrada, além do consumo das utilidades essenciais - água, oxigênio e energia elétrica -, quatro tipos de combustíveis são gerados como subprodutos dos processos produtivos, podendo os mesmos ser aproveitados em suas unidades fabris,⁽¹⁾ sendo eles³:

- gás de alto forno (*blast furnace gas* - BFG);
- gás de coqueria (*coke oven gas* - COG);
- gás de aciaria (*Linz-Dourwitz Gas* - LDG, também chamado de BOFG - *blast oxygen furnace gas*); e
- alcatrão (TAR) - Óleo viscoso produzido na Coqueria.

Como exemplo, a Figura 1 mostra um fluxograma simplificado típico de uma rede de gás de coqueria.

A Área de Utilidades corresponde ao setor da usina responsável pela distribuição desses combustíveis na mesma, sendo o fechamento do balanço de gás produzido e distribuído uma das suas principais atribuições.

O erro do balanço de gás equivale à diferença entre o volume de gás distribuído e o volume de gás produzido, normalmente calculado em percentagem em relação ao produzido. Na ArcelorMittal Tubarão, admite-se um valor de referência de 3,0 % para o erro do balanço de volume dos gases combustíveis. Quando este erro ultrapassa este valor de referência, as Seções de Manutenção são acionadas para verificação da(s) causa(s) do aumento do erro de balanço e correção de problemas, normalmente relacionados a medições de vazão.

2 DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

Em decorrência de expansões sucessivas da usina (5,0 Mt/ano, concluído em 2004, e 7,5 Mt/ano, concluído em 2007), foram acrescentados novos produtores e consumidores de utilidades fluidas (gases, vapor, água etc.) às instalações existentes, implicando em mudanças nas faixas de produção e consumo das utilidades. Em contrapartida, uma verificação dos balanços de volume dos gases combustíveis BFG e COG referente ao intervalo de tempo compreendido entre setembro de 2007 a fevereiro de 2008, revelou que o erro absoluto médio nos balanços de BFG e COG aumentou significativamente. Fazendo uma comparação com um mesmo intervalo de tempo anterior às expansões (setembro de 2000 a

¹ CLP: Controlador Lógico Programável (termo inglês: PLC, Programmable Logic Controller).

² SDCD: Sistema Digital de Controle Distribuído (termo em inglês: DCS, Distributed Control System).

³ Normalmente, as siglas correspondentes aos nomes dos combustíveis escritos em inglês são utilizadas para identificação dos gases na usina, sem tradução, devido à ampla utilização destes termos em todo o mundo.

fevereiro de 2001), constatou-se que os erros no balanço de volume destes combustíveis eram bem menores (veja os dados da Tabela 1).

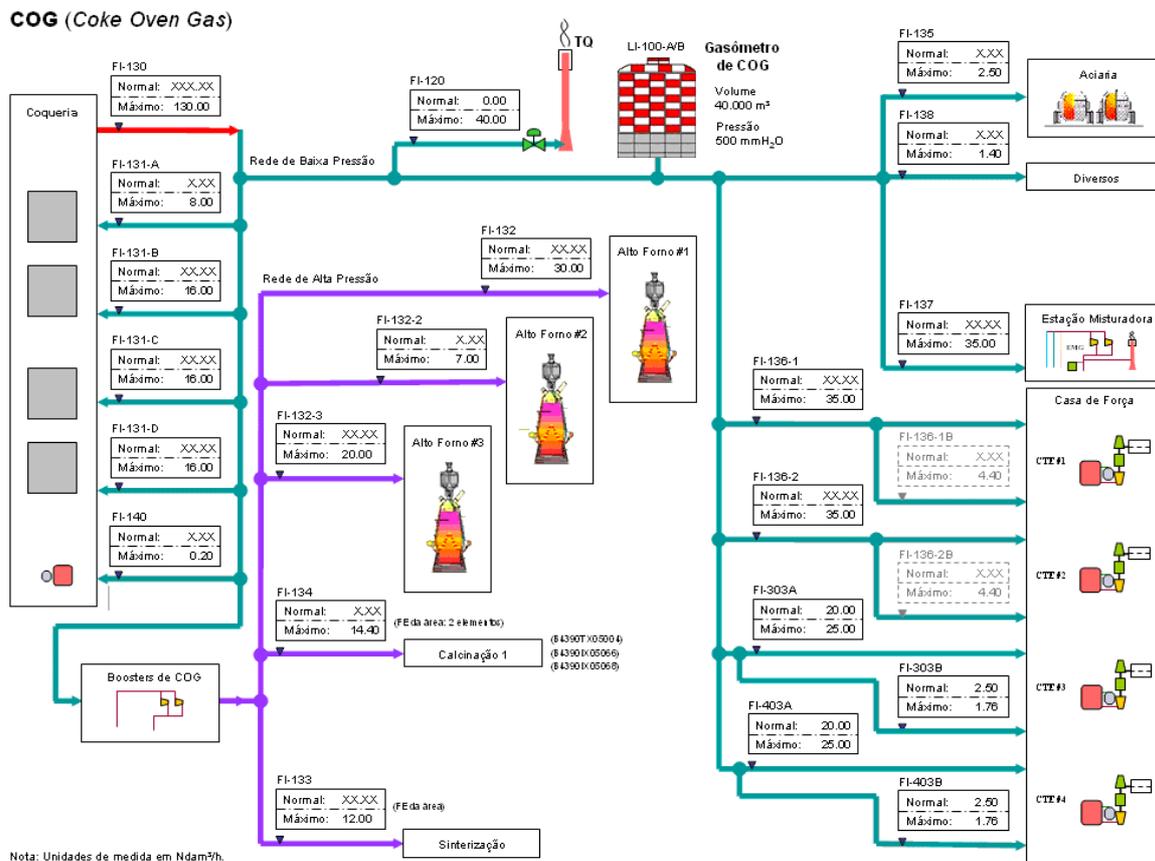


Figura 1. Fluxograma simplificado de uma rede de gás de coqueria (COG).

Tabela 1 - Erros de balanço de volume dos gases combustíveis BFG e COG

Período	COG		BFG	
	média	desvio padrão	média	desvio padrão
Set./2000 ~ Fev./2001	2,09 %	1,30 %	2,6 %	1,17 %
Set./2007 ~ Fev./2008	11,52 %	2,10 %	3,8 %	2,34 %

Medições adequadas das variáveis do processo são fundamentais para tomada de decisões, para cálculos de rendimento das unidades operacionais e otimizações das respectivas produções, com a conseqüente redução de custos. Do ponto de vista da distribuição de utilidades (Área de Utilidades), o volume de combustíveis que compõem o erro nos balanços deixa de ser contabilizado adequadamente nas unidades operacionais. Desta maneira, se o erro for positivo constitui perda financeira (insumo comprado e não apropriado), se negativo, constitui um ganho aparente. Estes fatores constituem as principais perdas resultantes do problema.

Para tratar o problema, em março de 2008 foi criado um projeto pela empresa com a seguinte meta inicial: reduzir o valor do erro absoluto médio do balanço de BFG em pelo menos 0,5% e do balanço de COG em pelo menos 3,0% até 30 de novembro de 2009. A redução destes erros, nestes percentuais, representaria para a

empresa uma recuperação financeira (contábil), no ano de 2008, de mais de U\$ 1,0 milhão na apropriação dos gases combustíveis BFG e COG.

Por meio da utilização das técnicas estabelecidas pela metodologia Seis Sigma, foi possível alcançar a meta em prazo menor e sem a necessidade da realização de novos investimentos pela empresa. As metas iniciais foram atingidas em outubro de 2008. Então, uma nova meta foi estabelecida apenas para o COG, que foi alcançada em maio de 2009, concluindo o projeto. A seguir, é feita uma descrição geral das ações realizadas para resolução deste problema.

3 REDUÇÃO DO ERRO DE BALANÇO UTILIZANDO O SEIS SIGMA

O Seis Sigma pode ser definido como uma metodologia ou estratégia gerencial disciplinada e altamente quantitativa, que tem como objetivo aumentar a lucratividade das empresas, por meio da melhoria da qualidade de produtos e processos e do aumento da satisfação de clientes e consumidores.⁽²⁾ Um dos elementos da infra-estrutura do Seis Sigma é a constituição de equipes para executar projetos que contribuam fortemente para o alcance das metas estabelecidas para a empresa.

O método compreende as seguintes etapas:

- **D** - *Define* (Definir): definição precisa do escopo do projeto;
- **M** - *Measure* (Medir): determinação do foco do problema;
- **A** - *Analyze* (Analisar): determinação das causas de cada problema prioritário;
- **I** - *Improve* (Melhorar): proposição, avaliação e implementação de soluções para cada problema prioritário; e
- **C** - *Control* (Controlar): certificação de que o alcance da meta seja mantido a longo prazo.

A junção das letras iniciais de cada etapa do método forma a sigla **DMAIC**, que muitas vezes é utilizada para referenciar o Seis Sigma.

Na ArcelorMittal Tubarão, o Seis Sigma já foi aplicado em diversos processos de melhoria, como na otimização da combustão dos regeneradores de um Alto Forno, no aumento do percentual de acerto de classificação no Laminador de Tiras a Quente, na redução do tempo médio de parada do sistema de nível 2, dentre outros. Os bons resultados obtidos com a metodologia justificaram sua escolha neste projeto.

3.1 *Define*: Definição do Escopo do Projeto

A meta definida inicialmente para o projeto foi a seguinte:

Reduzir o valor do erro absoluto médio do balanço de BFG em pelo menos 0,5% e do balanço de COG em pelo menos 3,0% até 30 de novembro de 2009.

O valor financeiro desta meta, em 2008, correspondeu a mais de U\$ 1,0 milhão.

O indicador utilizado para medir o resultado do projeto foi o erro absoluto médio mensal (*EAMM*), calculado por meio da seguinte fórmula:

$$EAMM = \frac{\sum_{d=1}^N |ED_d|}{N}$$

Onde:

ED_d = Erro diário do balanço do fluido (%);

N = número de dias do mês;

d = índice referente ao dia do mês ($1 \leq d \leq N$).

Para análise do problema foram utilizados dados registrados pelo computador de processo (PROCOM), que coleta continuamente informações das unidades de produção da usina, por meio das redes industriais de comunicação de dados, CLP's e SDCD's.

Na ocasião foram identificadas as seguintes restrições e considerações para o desenvolvimento do projeto:

- a) o campo de ação é amplo, abrangendo as diversas unidades operacionais produtoras e consumidoras dos gases combustíveis BFG e COG, tornando indispensável o suporte das equipes de Operação e Manutenção;
- b) o preço da energia considerado é de 17,16 US\$/Gcal, que equivale ao valor apurado pela Área de Distribuição de Energia (IGCD) da ArcelorMittal Tubarão para o ano de 2008, sendo passível de atualização em função do preço do carvão, do gás natural e da energia elétrica no mercado. Foram consideradas as relações de 0,85 Gcal/Ndam³ para o BFG e 4,48 Gcal/Ndam³ para o COG (referência: IGCD); e
- c) supõe-se que os dados obtidos dos sistemas de medição de vazão existentes são confiáveis. Nota: Para certificação de todas as medições seria necessária a realização de uma auditoria de todas as malhas de medição de BFG e COG (54 malhas), com custo total estimado de aproximadamente US\$ 60.000,00.

3.2 *Measure*: Determinação do Foco do Problema

Para determinação dos focos do problema, inicialmente, foram construídos gráficos de Pareto dos volumes de gás gerados durante o processo produtivo e consumidos em cada unidade operacional mensalmente. Como exemplo, a figura 2 mostra o gráfico de Pareto do volume de COG produzido pela Coqueria e dos volumes consumidos em cada unidade operacional, levantados na época. Por meio do gráfico foi possível identificar as malhas de medição de maior relevância em termos de volume de gás. Dessa maneira, iniciou-se uma análise dos sistemas de medição e integração de vazão, com prioridade às malhas mais relevantes.

Durante realização de levantamento de dados (final de agosto/2008), foram identificados erros em fórmulas utilizadas no Procom para geração dos relatórios mensais de balanços de utilidades. Estes erros foram reportados à equipe responsável pela manutenção deste sistema. Após correções das fórmulas e reprocessamento da base de dados, foram obtidos dados históricos corrigidos. Devido a este fato, a meta do projeto precisou ser revisada porque os números reais se mostraram bem melhores do que se imaginava. Na Figura 3 é possível observar a característica dos dados antes e após as correções.

Apesar da melhoria obtida com a correção das fórmulas, na ArcelorMittal Tubarão é aceito um valor de referência de 3,0% para os erros médios dos balanços de gases combustíveis. Portanto, os novos dados apurados para o BFG atenderam perfeitamente à meta estabelecida inicialmente e ao valor de referência (média de

0,88 % e desvio padrão de 0,88%). Entretanto, mesmo o COG tendo obtido uma redução significativa de erro e atendido à meta inicial, sua média (apurada em 2,60%, com devido padrão de 1,01%) permaneceu muito próxima ao valor de referência.

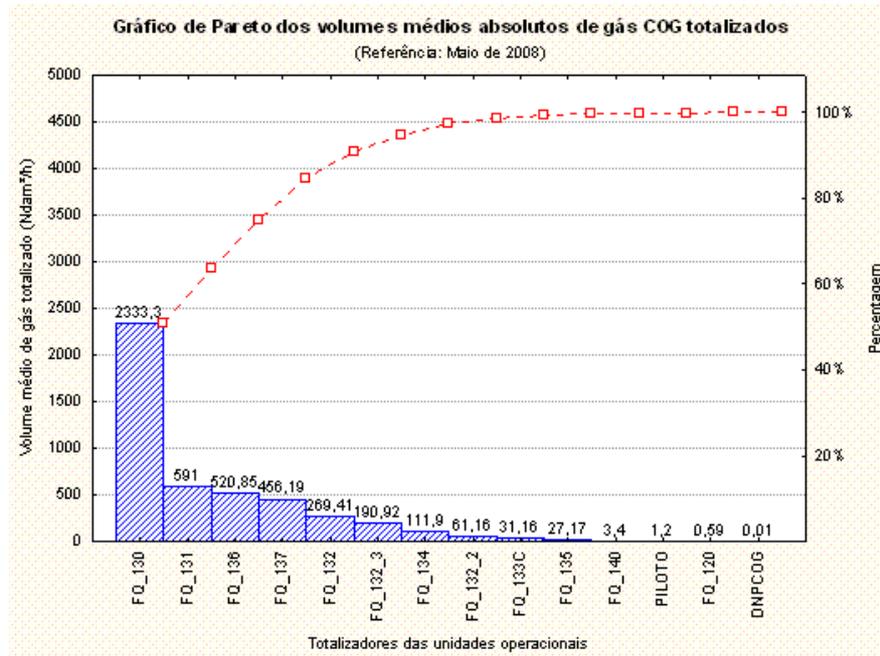


Figura 2. Gráfico de Pareto dos volumes de gás COG.

Portanto, uma nova meta foi estabelecida, apenas para o COG:

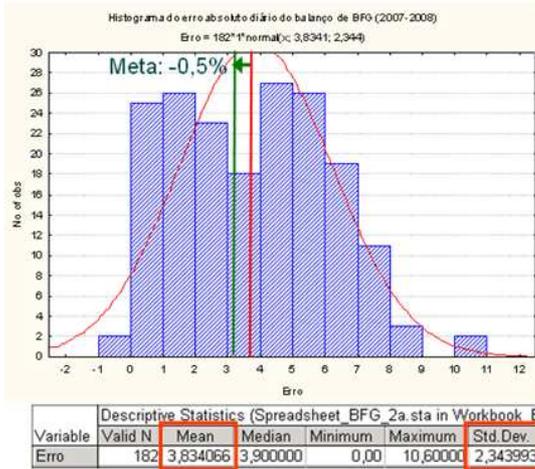
Reduzir o valor do erro absoluto médio do balanço de COG em pelo menos 0,5% até 30 de novembro de 2009 (valor atual de referência: 2,4652 %, apurado de maio a outubro de 2008).

Desta maneira, os focos do problema foram restringidos às malhas de COG. Com o auxílio do gráfico de Pareto, foram selecionadas as seguintes malhas relevantes para análise:

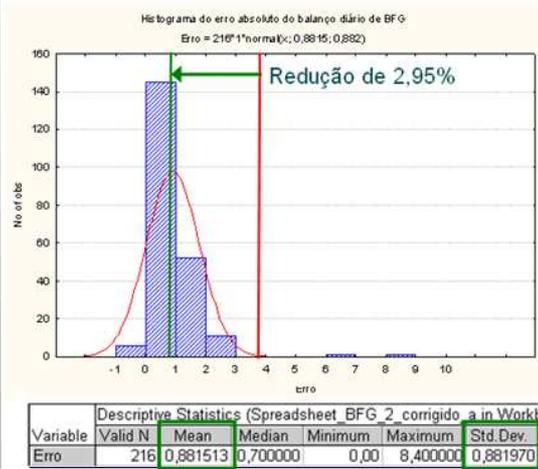
- malha de vazão de gás produzido na Coqueria (FQ_130), com uma medição de vazão; e
- malha de vazão de gás consumido na própria Coqueria (FQ_131), que inclui internamente 7 (sete) medições de vazão⁴.

⁴ Duas derivações da rede de distribuição de COG para estações misturadoras da Coqueria não estão indicadas na Figura 1.

Característica dos dados de referência utilizados para definição da meta (set./07 – fev./08):

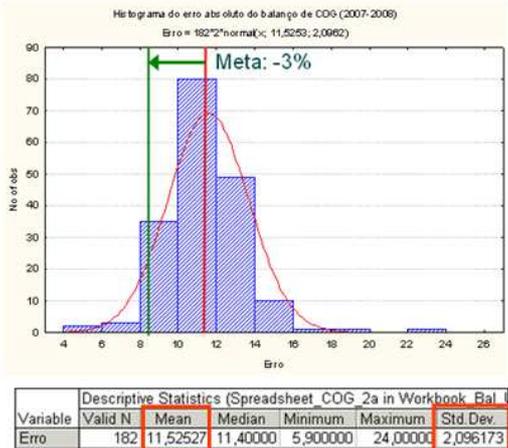


Característica dos dados após correções realizadas no PROCOM (mar./08 – set./08):

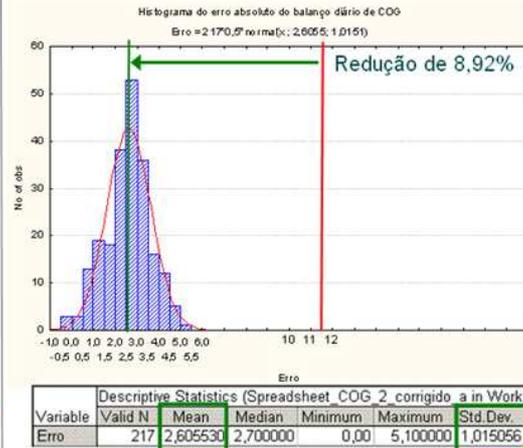


(a) Histograma dos erros absolutos de balanço diário de BFG

Característica dos dados de referência utilizados para definição da meta (set./07 – fev./08):



Característica dos dados após correções realizadas no PROCOM (mar./08 – set./08):



(b) Histograma dos erros absolutos de balanço diário de COG

Figura 3. Comportamento histórico dos dados.

3.3 Análise: Determinação das Causas Relevantes

Após levantamento dos instrumentos e equipamentos instalados que participam da malha de medição do COG produzido e consumido na Coqueria (desde o campo até o nível de supervisão da produção), foi possível esquematizar um mapa do processo gerador do problema, conforme Figura 4.

Neste processo, os sinais dos instrumentos de campo são enviados a um SDCD, que realiza o cálculo da vazão de gás. Os valores de vazão são então transmitidos a um CLP da Área de Utilidades (utilizando sinais analógicos, 4-20 mA). No CLP é realizada a conversão do sinal analógico de corrente em valores em unidade de engenharia. Estes valores convertidos no CLP são integralizados e disponibilizados para leitura pelo Procom em endereços de memória do CLP. O processo termina com o registro dos dados e geração dos relatórios de balanço de volume pelo Procom.

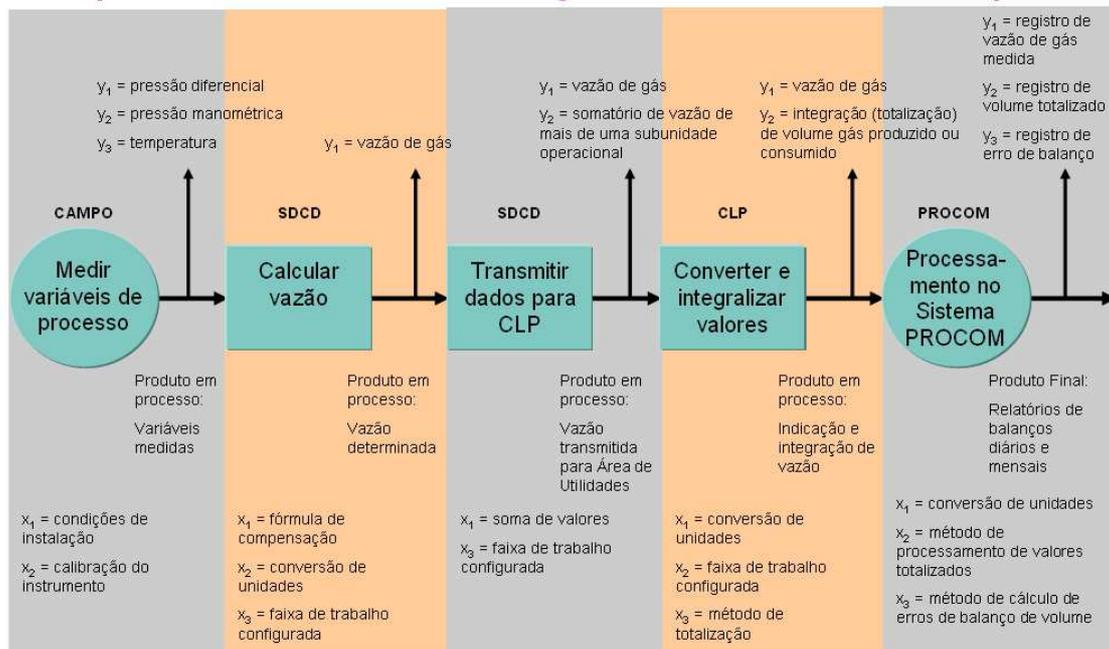


Figura 4. Mapa de processo da medição e integração de COG da Coqueria.

Realizando uma análise das variáveis envolvidas no processo, a equipe do projeto atribuiu pesos a essas variáveis, considerando o grau de influência esperado de cada variável sobre as malhas de medição de vazão, conforme experiência da equipe. O resultado obtido foi a matriz de priorização apresentada na Tabela 2. Por meio da matriz de priorização foram identificadas as causas relevantes:

- inconsistência na calibração de instrumento;
- erro em fórmulas de compensação;
- erro em conversão de unidades; e
- inconsistência em faixa de trabalho configurada em algum dos equipamentos envolvidos no processo.

Tabela 2. Matriz de priorização da medição de vazão de COG da Coqueria

INPUTS	OUTPUTS					TOTAL	Percentual
	Medição de Variáveis do Processo	Vazão de Gás COG	Transmissão de Vazão para a Área de Utilidades	Indicação e Integração de Vazão	Relatórios de Balanços Diários e Mensais		
Peso	10	10	10	10	10	90	12,50
Condições de instalação	3	3	1	3	3	15	1,67
1 Calibração do instrumento	5	5	1	5	5	150	20,83
2 Fórmula de compensação	0	5	1	5	5	100	13,89
3 Conversão de unidades	0	5	5	5	5	100	13,89
4 Faixa de trabalho configurada	0	5	5	5	5	100	13,89
Soma de valores	0	0	5	3	3	30	4,17
Método de totalização	0	0	0	5	5	50	6,94
Método de processamento de valores totalizados	0	0	0	0	5	50	6,94
Método de cálculo de erros de balanço de volume	0	0	0	0	5	50	6,94
TOTAL	80	230	180	310	410	TOTAL	100,00

Legenda:
 5 = Correlação forte
 3 = Correlação moderada
 1 = Correlação fraca
 0 = Correlação ausente

Portanto a análise do problema foi restringida a estas quatro causas consideradas relevantes. A partir deste ponto, as seguintes hipóteses foram formuladas acerca da influência de cada causa sobre o problema:

- a atual calibração dos instrumentos de campo está em conformidade com os dados de projeto e com a configuração do SDCD?
- as fórmulas de cálculo de vazão e compensação de pressão e temperatura implementadas no SDCD estão em conformidade com os dados de projeto?
- existem erros nas conversões de unidades no SDCD ou no CLP?
- a atual configuração da faixa de trabalho em “transmissão de dados” nos equipamentos da Área de Utilidades (CLP e PROCOM) interfere no erro médio absoluto do balanço de COG?

Para comprovação destas hipóteses foram estabelecidos métodos de análise para cada uma delas, baseados principalmente na comparação entre valores de projeto, valores reais e configurações nos instrumentos de campo, SDCD e CLP. Após as verificações, a equipe do projeto conseguiu identificar diversos tipos de problemas e foi possível quantificar a influência de cada causa - baseada na participação da medição em relação ao volume total - sobre o balanço de volume de COG, conforme mostrado na Tabela 3.

Tabela 3. Quantificação das causas

Causa N°	Descrição	Erro estimado p/ balanço de COG
1	Calibração do Instrumento	-0,04%
2	Fórmula de Compensação	1,06%
3	Conversão de Unidades	-0,01%
4	Faixa de trabalho configurada	0,00%
TOTAL		1,01%

Como resultado, estimou-se que os problemas identificados poderiam contribuir com um erro de 1,01% no balanço de volume de COG.

3.4 *Improve*: Implementação das Soluções

Para tratar as causas fundamentais identificadas, foi necessário elaborar um plano de trabalho com instruções para correção de configurações do SDCD e para revisão da calibração dos instrumentos de campo pelo pessoal de manutenção. Não foi possível priorizar a implantação de soluções individualmente, pois os problemas identificados estavam inter-relacionados. No caso, foi recomendado que as ações para solução dos problemas identificados fossem realizadas simultaneamente, pois a correção da calibração dos instrumentos deveria ser acompanhada de correção da configuração do SDCD.

Devido ao risco de perturbação momentânea no controle de vazão de COG nas Baterias de coque da Coqueria durante a implantação das soluções, medidas de controle foram incluídas no Plano de Trabalho para assegurar que os riscos operacionais fossem minimizados durante a implantação.

Nos dias seguintes à implantação das soluções na Área da Coqueria foi possível observar uma melhoria do indicador apurado diariamente, conforme indicado na Figura 5.

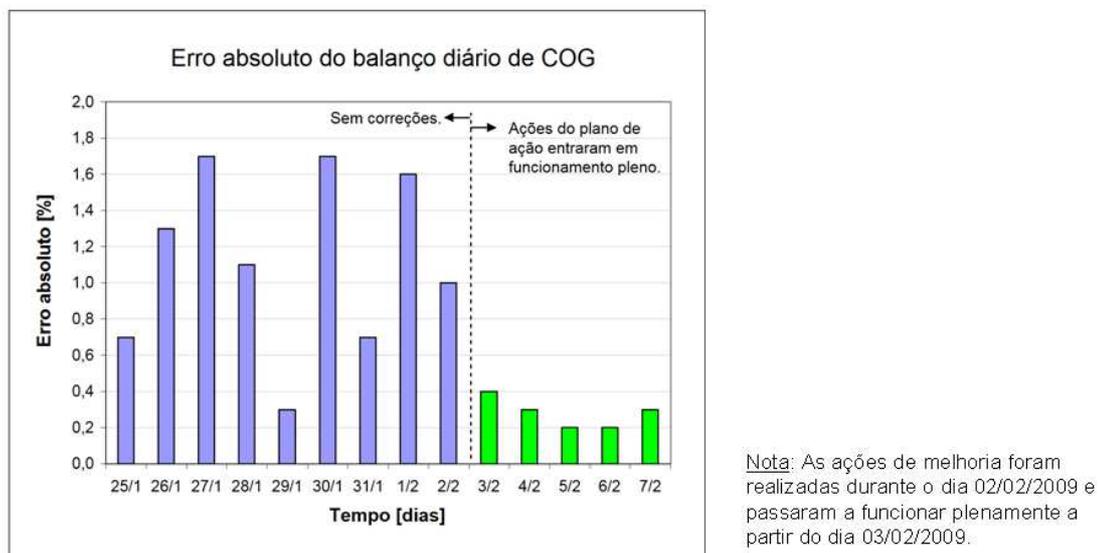


Figura 5. Dados preliminares observados dias antes e após a implantação das soluções.

3.5 **Control:** Monitoração do Erro de Balanço

A verificação do comportamento do indicador durante quatro meses seguidos comprovou que a nova meta estabelecida também foi alcançada. Os valores apurados do indicador ao longo do tempo podem ser vistos na Figura 6.

A partir dos dados registrados, as médias do indicador, calculadas antes e depois da implantação do plano de ação, revelaram que o projeto trouxe uma redução do erro do balanço de COG de 1,09%, tomando como referência os dados utilizados para definição da nova meta. Levando em conta os valores de erro do balanço de COG apurados no início do projeto (11,52%), a redução total foi de 10,02%.

Notou-se que o resultado obtido em redução de erro absoluto do balanço de COG (1,09%), em média, é muito próximo do valor potencial de redução estimado durante a etapa de quantificação das causas (1,01%).

4 RESULTADOS

Os resultados alcançados superaram as metas estabelecidas no início do projeto. Com a redução dos erros dos balanços de volume dos gases combustíveis BFG e COG, o projeto produziu uma recuperação financeira (contábil) de US\$ 10.816.833,96/ano para a apropriação de custos das unidades operacionais consumidoras e produtoras destes combustíveis.

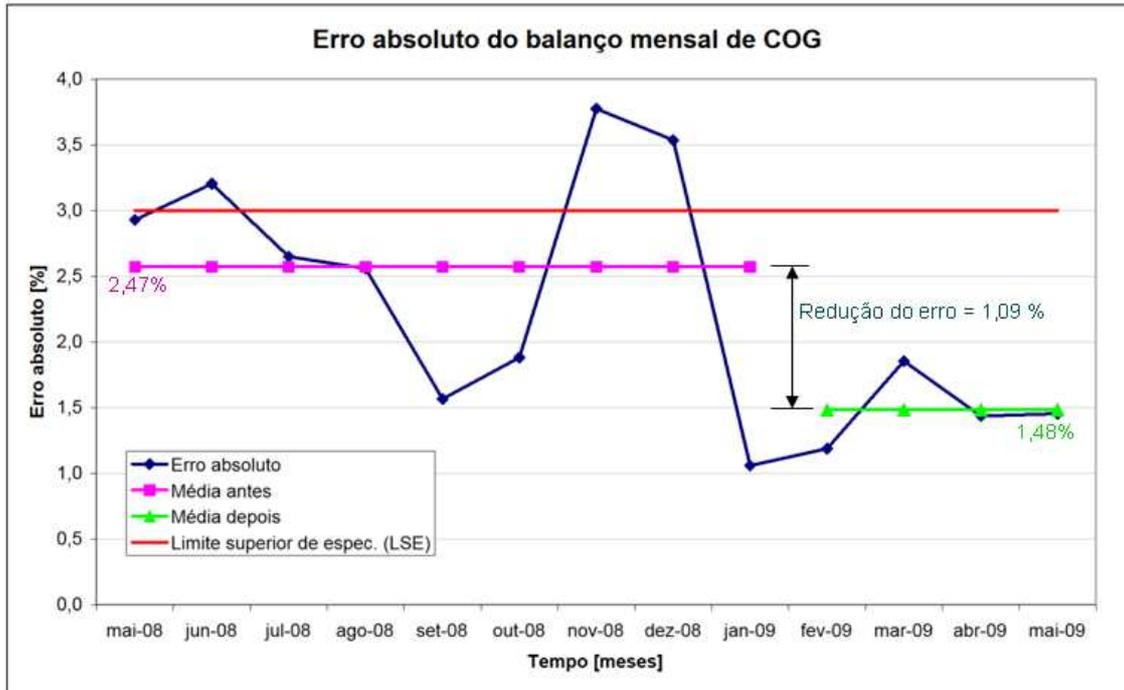


Figura 8. Comportamento do indicador ao longo do tempo.

Um comparativo do erro absoluto do balanço mensal de COG foi feita com as usinas do grupo ArcelorMittal de Gijón e Avilés, localizadas na Espanha. Cada uma delas produziu, no período estudado, aproximadamente metade do volume de COG produzido na ArcelorMittal Tubarão. Como pode ser visto na Figura 7, o erro de balanço na ArcelorMittal Tubarão é significativamente menor.

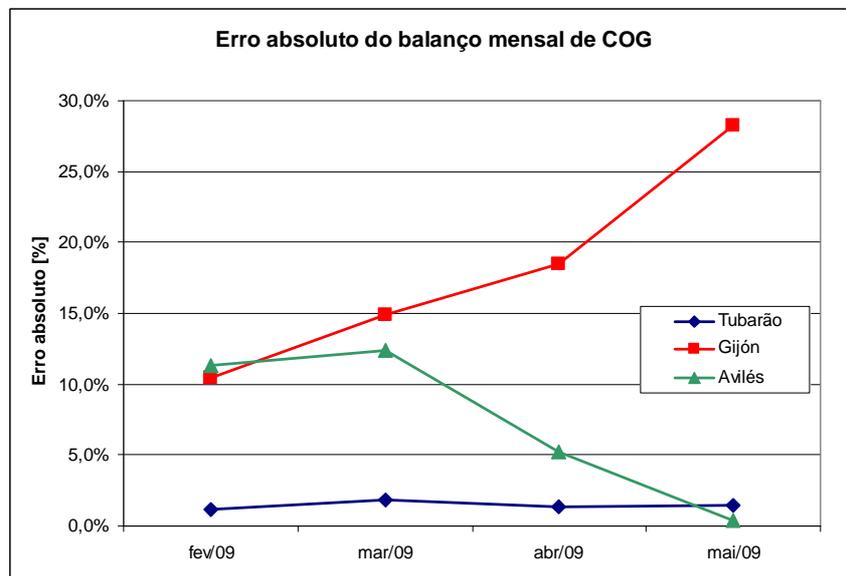


Figura 7. Comparativo do erro absoluto de COG.

5 CONCLUSÃO

O cálculo do erro de balanço de utilidades permite, além de identificar a participação de cada área no consumo, evitar a má utilização de recursos – como nos erros de medição – e os desperdícios no consumo. O principal resultado deste

projeto foi reduzir o erro de balanço dos gases BFG e COG para abaixo do valor de referência 3,0%, definido pela área de Utilidades da ArcelorMittal Tubarão.

Durante a etapa de definição do escopo do projeto, foi levantada uma dúvida quanto à confiabilidade dos dados medidos. A realização de uma auditoria de todas as medições de BFG e COG da usina, para certificação da confiabilidade das medições de vazão, custaria à empresa aproximadamente US\$ 60.000,00. Entretanto, por meio da atuação nos focos principais do problema, foi possível alcançar a meta do projeto sem a necessidade de contratação do serviço de auditoria.

Os resultados obtidos dão mais sustentação à aplicação do Seis Sigma, que já é utilizado com sucesso na ArcelorMittal Tubarão.

A metodologia de correção das medições empregada neste projeto, apesar de utilizada em gases, tem uma vasta possibilidade de aplicação.

Além de reduzir o erro de balanço, medições corretas podem ajudar na previsibilidade do consumo de combustíveis em cada área. Isto é muito importante no caso de combustíveis que são comprados de terceiros, como é o caso, na ArcelorMittal Tubarão, do gás natural. Um erro maior que o estabelecido em contrato, entre o consumo real da usina e o valor informado com antecedência à fornecedora, implica em pagamentos de multas pela ArcelorMittal. Por isso, recomenda-se a aplicação do Seis Sigma com o objetivo de melhorar a previsão do consumo de gás natural na usina.

Agradecimentos

Os autores agradecem a importante colaboração das seções de manutenção das áreas de Utilidades e Coqueria da ArcelorMittal Tubarão, e ao departamento de Energias da ArcelorMittal Asturias.

REFERÊNCIAS

- 1 MOURÃO, M. B. Introdução à Siderurgia, 1a. ed., Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, São Paulo , 2007.
- 2 WERKEMA, Cristina. Criando a Cultura Seis Sigma, 3a. ed., Ed. Werkema, Nova Lima, 2004.
- 3 MARTINS, Nelson. Manual de medição de vazão através de placas de orifício, bocais e venturis, 1a. ed., Ed. Interciência, Rio de Janeiro, 1998.