



# DESENVOLVIMENTO E APLICAÇÃO DE SIMULADOR NA CTE2 PARA MELHORIA DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA<sup>1</sup>

Nelson Neves Teixeira<sup>2</sup>

Márisson Pedro Baesso<sup>3</sup>

Marcos Vinícios Salazar<sup>4</sup>

Luis Paulo Silva<sup>5</sup>

Mauro Candido Menezes de Souza<sup>6</sup>

## Resumo

A presente contribuição técnica apresenta o trabalho desenvolvido e implantado pela equipe técnica e operacional da Gerência de Geração de Energéticos focado na otimização da absorção de combustíveis siderúrgicos (Gás de Coqueria - GCO; Gás de Aciaria - GLD; e Gás de Alto Forno - GAF), na geração de energéticos (Energia Elétrica, vapor e ar soprado), e a redução no consumo de Gás Natural. Por ser estratégico, este buscou-se a melhoria na garantia operacional da Usina, quanto à energia em Gcal gerada e disponibilizada internamente. Visando o menor investimento, o grupo voltou-se então para a implantação de recurso de análise rápida a frente de trabalho e de planejamento de geração, onde se buscou um modelo matemático na eficiência energética da CTE2. Tomando-se como base os recursos do *green belt*, e por se ter várias entradas e várias saídas no processo, optou-se pelo método estatístico de regressão na concepção dos coeficientes de regressão PLS (*Partial Least Squares*) na composição do modelo matemático e do simulador. O trabalho detalha o desenvolvimento e implantação do simulador e um melhor planejamento de consumo de combustível siderúrgico contra um menor volume de GN.

**Palavras-chave:** Modelo matemático; Estatística; Eficiência energética; Simulador.

## DEVELOPMENT AND APPLICATION OF THE SIMULATOR CTE2 FOR IMPROVEMENT OF ENERGY EFFICIENCY

### Abstract

This contribution presents the technical work developed and deployed by the technical staff and operational management of Generation of Energy focused on optimizing the absorption of iron and steel fuel (Coke Gas - GCO; Gas Steelmaking - GLD; and Blast Furnace Gas - GAF) in the generation of energy (Electricity, steam and air blown), and reduced consumption of natural gas. By being strategic, it sought to guarantee the improvement in operating the Plant, the energy generated in Gcal and made available internally. Aiming to lower investment, the group then turned to the deployment of analytics fast forward to working and planning of generation, where we seek a mathematical model of energy efficiency CTE2. Taking as basis the resources of the green belt, and having multiple inputs and multiple outputs in the process, we opted for the statistical method of regression in the design of regression coefficients PLS (Partial Least Squares) in the composition of the mathematical model and simulator. The paper details the development and implementation of the simulator and a better planning of fuel steel against a lower volume of NG.

**Key words:** Mathematical model; Statistics; Energy efficiency; Simulator.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 31º Seminário de Balanços Energéticos Globais e Utilidades e 25º Encontro de Produtores e Consumidores de Gases Industriais, 17 a 20 de agosto de 2010, Foz do Iguaçu, PR

<sup>2</sup> Coordenador de Projetos Especiais da Gerência Geral de Energéticos e Utilidades (GGCE)

<sup>3</sup> Engenheiro Especialista da Gerência de Geração de Energéticos (GGE)

<sup>4</sup> Engenheiro de Manutenção Sênior da Gerência de Geração de Energéticos (GGE)

<sup>5</sup> Supervisor de Turno de Energéticos da Gerência de Geração de Energéticos (GGE)

<sup>6</sup> Líder de Energéticos da Gerência de Geração de Energéticos (GGE)



## 1 INTRODUÇÃO

A Central Termoelétrica 2 (CTE#2) é composta por dois conjuntos turbo-geradores, responsáveis pela produção de energia elétrica de 60 Hz para Usina Presidente Vargas (UPV) (Figura 1). Essas máquinas respondem por cerca de 60% da demanda interna de consumo de energia elétrica da UPV.

O objetivo deste trabalho foi o de desenvolver e implantar um simulador, assim como a possibilidade de um melhor planejamento de consumo de combustível siderúrgico contra um menor volume de gás natural, com vistas na melhoria da gestão da CTE#2. A intenção é focada na otimização da absorção de combustíveis siderúrgicos (Gás de Coqueria - GCO; Gás de Aciaria - GLD; e Gás de Alto Forno - GAF), na geração de energéticos (Energia Elétrica, vapor e ar soprado) visando a redução no consumo de Gás Natural, ou seja, obter o menor custo na geração de energéticos para atendimento da demanda interna de consumo na UPV.

Situações operacionais foram analisadas, as causas contribuintes identificadas e tratadas como consideração para a composição dos dados para a formulação matemática.

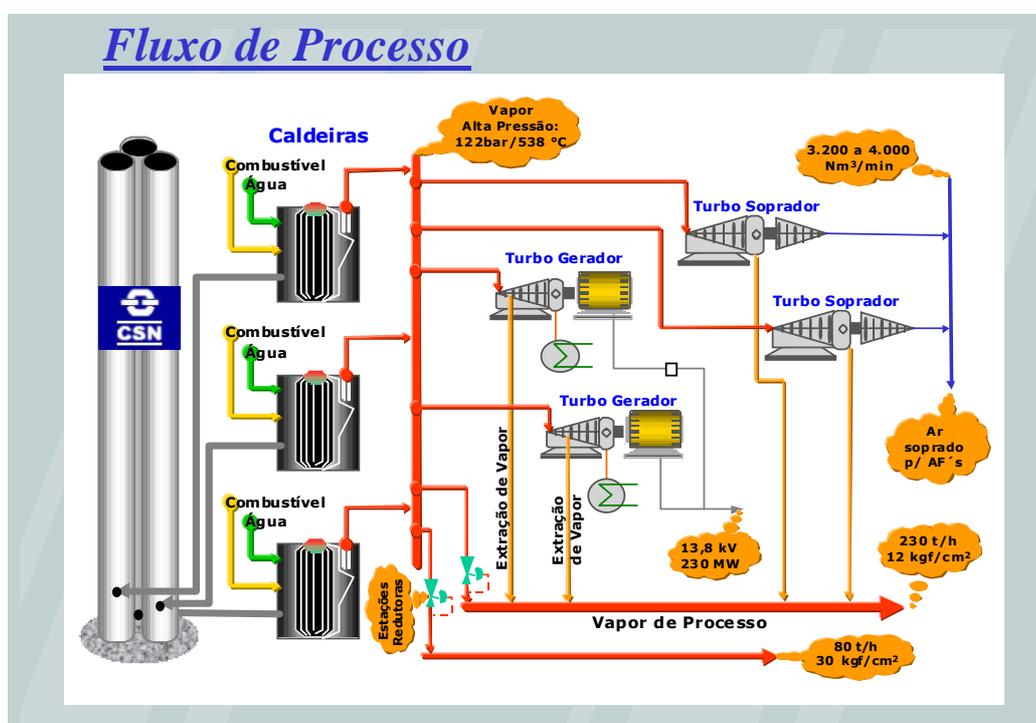
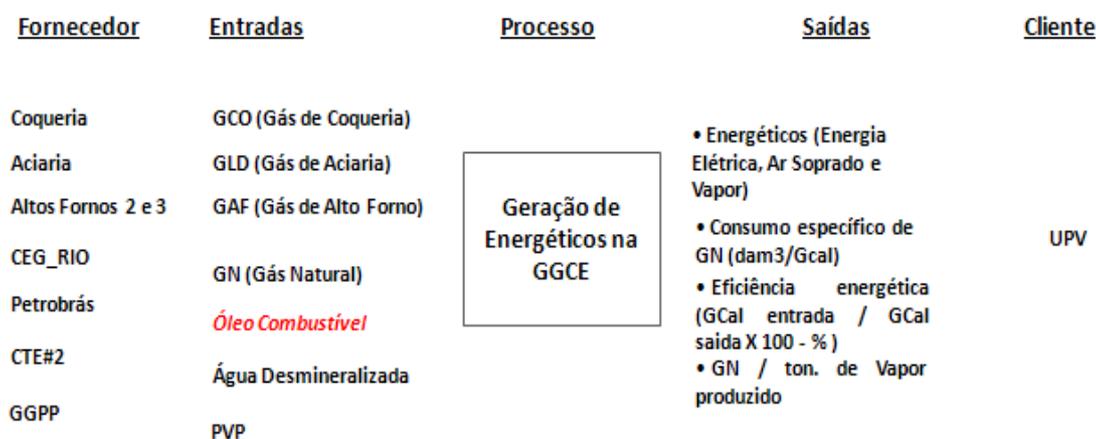


Figura 1 - Fluxo do processo da Central Termoelétrica 2.

## 2 CARACTERÍSTICAS DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGÉTICOS

Conforme citado anteriormente, o processo de geração de energéticos (Energia Elétrica, vapor e ar soprado), usa como base a informação de disponibilização de combustíveis siderúrgicos através de planejamento de geração, a partir do Planejamento de Vendas da Produção (PVP) da Usina Presidente Vargas (UPV). Este Plano apresenta para o ano, mês a mês o programa de produção o qual após análise resulta no volume de geração desses combustíveis siderúrgicos, o qual estará sendo disponibilizado pela equipe de combustíveis, através do SICOM (Sistema de Combustíveis), para consumo nas linhas de produção e pela equipe de operadores da sala de controle da CTE#2 na geração de energéticos (Figura 2), conforme demanda de consumo.



*Nota: O óleo combustível é usado somente em situação de emergência*

**Figura 2** - Diagrama do processo de geração de energéticos.

A CTE#2 gera aproximadamente 60% da energia elétrica necessária para a UPV, já os outros 40% de energia é fornecida por fornecedores externos (Itasa e Igarapava).

A redução no consumo de Gás Natural versus aumento no consumo de gases siderúrgicos é estratégica, visto que o mesmo foi escolhido para melhoria na garantia operacional da UPV, quanto à energia em Gcal gerada e disponibilizada internamente. Para este caso, não será considerado o "in put" do óleo combustível por ser empregado no processo somente em situação de emergência

### 3 HISTÓRICO

A CTE#2 foi projetada para uma eficiência energética de 35% (aceite de partida da planta com maior consumo de GN do que Gases Siderúrgicos) e o resultado médio atual obtido é de 32,27% (período de janeiro a novembro/2008), para um mix de gases siderúrgicos e GN utilizado na geração de energéticos, principalmente Energia Elétrica que deve estar na ordem de 181 MW para atender as cargas prioritárias para a produção da UPV até Placas com um menor custo.

Na prática por se ter a falta de definição de um ponto ótimo para maior consumo de mix de gases siderúrgicos disponibilizados contra um volume menor de Gás Natural (17 dam<sup>3</sup>/h médio) na produção de energéticos na CTE#2, é que nos levou a pesquisar e desenvolver um modelo matemático para a eficiência energética da CTE#2, que permitisse estabelecer esse ponto em dadas situações operacionais futuras, visando a otimização da absorção de gases siderúrgicos, na geração de energéticos (Energia Elétrica, vapor e ar soprado) bem como a redução no consumo de Gás Natural.

O gerenciamento de combustíveis tem um papel de extrema importância no controle e monitoração da distribuição dos combustíveis, utilizados no processo siderúrgico. Tem como objetivo principal o total aproveitamento de energia, principalmente dos gases gerados internamente, de modo operacional seguro e integrada com os consumidores (Figuras 3 e 4), dentro de uma escala de prioridade pré-estabelecida.

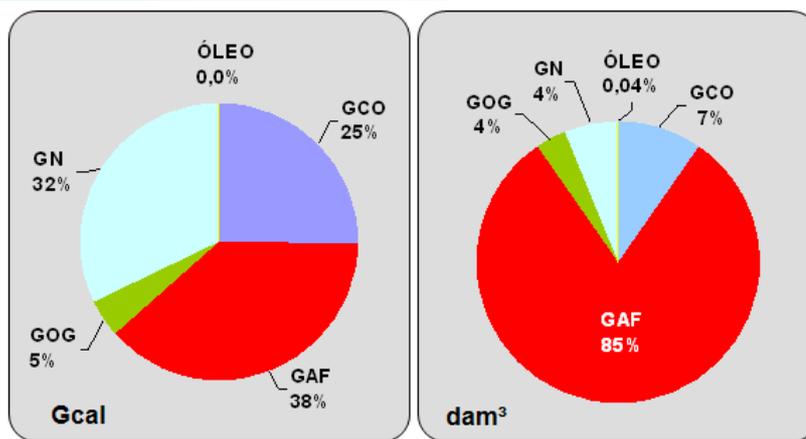


Figura 3 - Consumo de combustíveis na UPV.

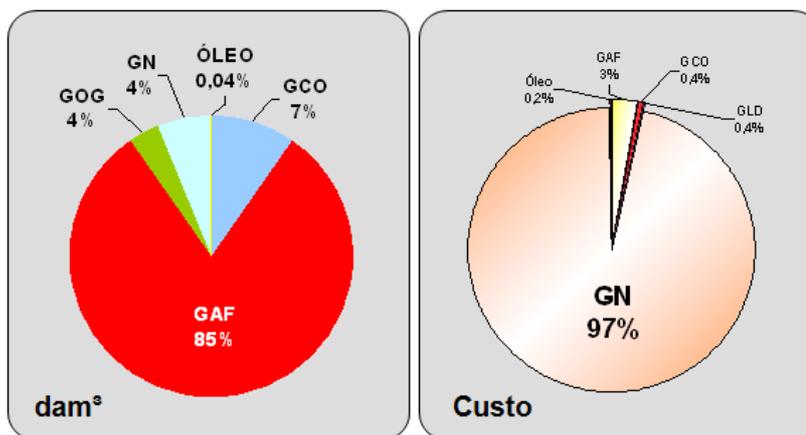


Figura 4 - Consumo de combustíveis na UPV.

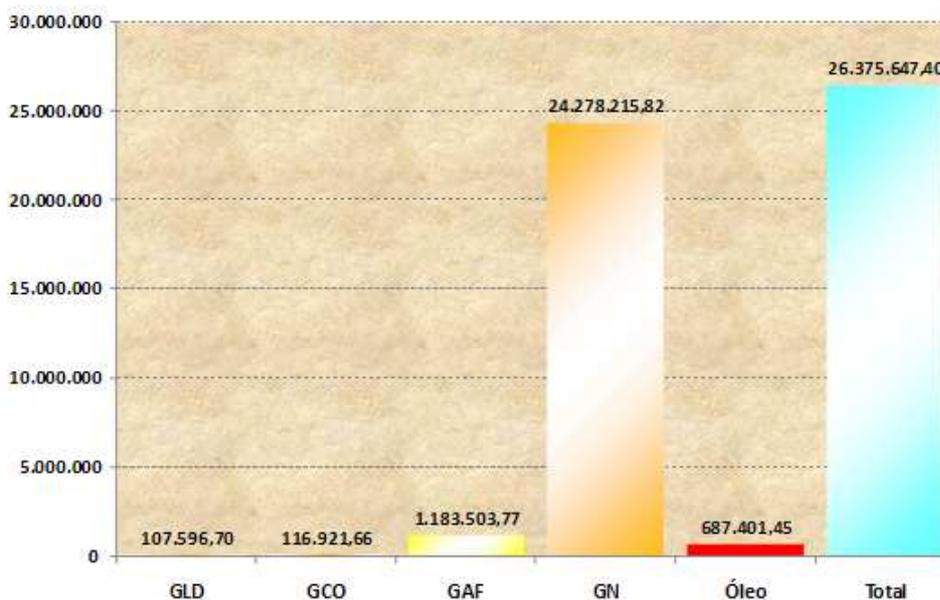


Figura 5 - Custo de combustível em R\$ - Média jan. a dez 2008.

Considerando potencial ganho no rendimento no uso dos gases siderúrgicos é que começamos a estudar, desenvolver e implantar um simulador matemático para o uso pela equipe de operadores da sala de controle da CTE#2 na geração de energéticos, assim como na possibilidade de um melhor planejamento de consumo de combustível siderúrgico contra um menor volume de gás natural, com vistas na melhoria da gestão da unidade e áreas afins, no caso UG50 (Unidade geradora de energia em 50Hz).



#### 4 DESENVOLVIMENTO DO ESTUDO

Mediante o cenário de operação da planta de geração de energéticos observou-se operações interdependentes entre as equipes tanto do Sistema de Distribuição de Combustíveis quanto da Geração e entre estas mesmas equipes no turno. Buscavam atender a programação na geração de energéticos sem se preocuparem com o aspecto custo. Tal fato se residia principalmente por não possuírem na prática a definição de um ponto ótimo para maior consumo de mix de gases siderúrgicos disponibilizados contra um volume menor de Gás Natural versus menor custo de produção (Figuras 6 e 7).

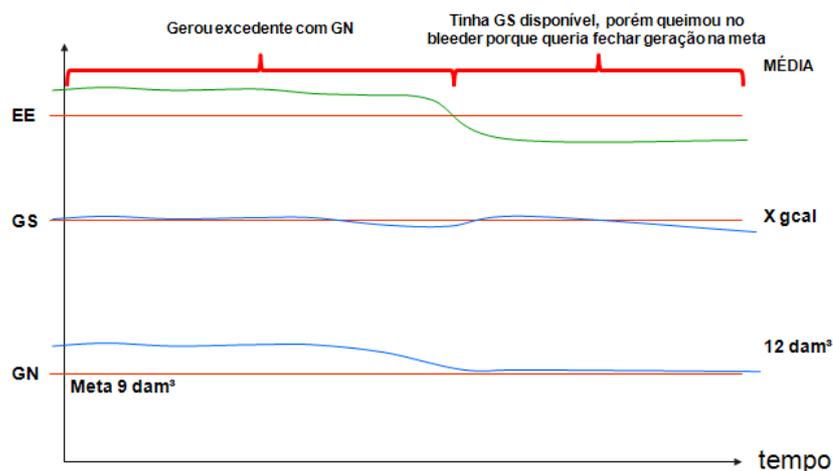


Figura 6 - Geração de 140 MWh - GN fora da meta - sem recuperação.

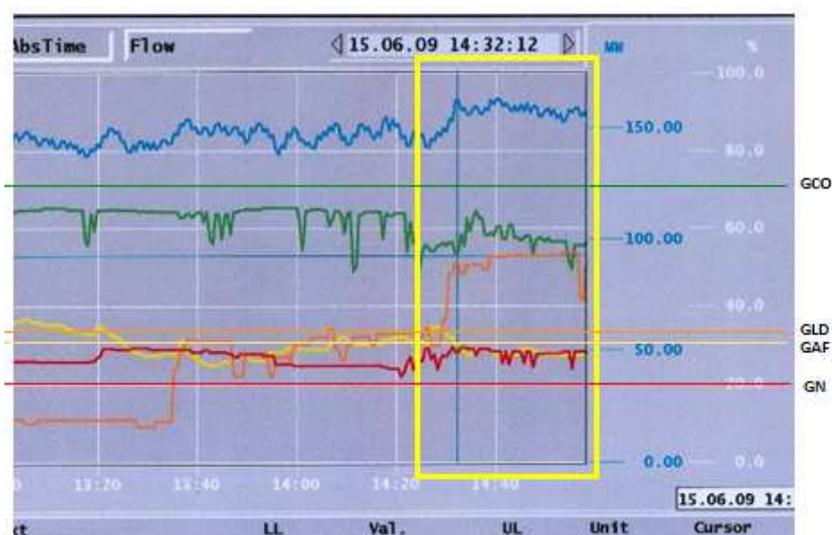


Figura 7 - Geração acima da meta com GN.

Conforme orientação do planejamento, as metas fechadas no segundo dia útil de cada mês, voltada para o cumprimento do programa, detalhavam a composição dos energéticos necessários à UPV (Figura 8), segundo a disponibilidade dos gases siderúrgicos em Gcal. Porém a realidade é outra para o melhor “modus operandis” da planta da CTE#2, pois os operadores operavam a mesma sem poder simular os melhores modos de consumo de combustíveis em função de qualquer fator que alterasse, para mais ou para menos, o volume dos combustíveis siderúrgicos.



<b>EE – 140 MWh</b>	<b>GAF – 311 dam<sup>3</sup> - 242,6 Gcal</b>
<b>VAP12 – 46kg/s</b>	<b>GLD – 47 dam<sup>3</sup> - 89,3 Gcal</b>
<b>VAP30 – 2,4kg/s</b>	<b>GCO – 24 dam<sup>3</sup> - 104,4 Gcal</b>
<b>AR – 25kg/s (cons. vap. TSO)</b>	

Saída 160 Gcal

Entrada ~ 430 Gcal

 $\eta$  31%  
Entrada ~ 510 Gcal

$$GN = \frac{510 - 430}{8,664} = 9,23 \text{ dam}^3$$

1,3 por caldeira + 5 injeção

Figura 8 - Exemplo de melhor prática de operação da planta.

Com o objetivo de alcançar de obter e aplicar o simulador com o menor investimento para esse projeto, a equipe voltou-se para a utilização recurso de análise rápida a frente de trabalho e de planejamento de geração, inicialmente coletando dados da entrada e saídas do processo (Figura 9).

<u>Fornecedor</u>	<u>Entradas</u>	<u>Processo</u>	<u>Saídas</u>	<u>Cliente</u>
Coqueria	GCO (Gás de Coqueria)	<div style="border: 1px solid black; padding: 5px; width: fit-content; margin: auto;">Geração de Energéticos</div>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Energéticos (Energia Elétrica, Ar Soprado e Vapor)</li> <li>Consumo específico de GN (dam<sup>3</sup>/Gcal)</li> <li>Eficiência energética (GCal entrada / GCal saída X 100 - %)</li> <li>GN / ton. de Vapor produzido</li> </ul>	UPV
Aciaria	GLD (Gás de Aciaria)			
Altos Fornos 2 e 3	GAF (Gás de Alto Forno)			
CEG_RIO	GN (Gás Natural)			
Petrobrás	Óleo Combustível			
CTE#2	Água Desmineralizada			
GGPP	PVP			

Figura 9 – Detalhamento dos dados de entrada e saída a serem coletados.

Os dados coletados compreendeu a uma amostra do período de janeiro de 2008 a janeiro de 2009 e para a utilização de um modelo matemático na eficiência energética da CTE2, visando a sua otimização. Para se ter um modelo mais próximo da realidade foi extraído os ruídos, que poderiam impactar em um modo de decisão de operação fora da realidade. Para tanto os ruídos extraídos foram: Reparos Gerais e Manutenções Preventivas; Paradas de Processo (Altos Fornos, Aciaria, CTE#2); Consumo de Óleo BPF e Alcatrão (situação de emergência ou falta de outro combustível); Baixo Consumo de GS (Todos os valores de consumo de Gases Siderúrgicos abaixo do mínimo estabelecido: GAF – 390 dam<sup>3</sup>/h mín; GLD – 44 dam<sup>3</sup>/h mín; e GCO – 8 dam<sup>3</sup>/h mín).

Tomando os dados como base de cálculo o grupo verificou a possibilidade do uso dos recursos do *green belt*, no uso de ferramentas estatísticas, e por se ter várias entradas e várias saídas no processo, optou-se pelo método estatístico de regressão na concepção dos coeficientes de regressão. Ressalta-se que os objetivos do método de regressão são: Construir modelos empíricos a partir de dados históricos; Estimar parâmetros em um modelo estatístico de regressão; Testar hipóteses estatísticas e construir intervalos de confiança; Propor modelo de regressão para predições apropriadas para observações futuras; Aplicar modelo de



correlação. Salienta-se que para a aplicação do modelo de correlação toma-se como base a equação que melhor representa a relação entre as variáveis,

$$E(Y|x) = \mu_{Y|x} = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon,$$

sendo  $\varepsilon$  o termo de erro aleatório (Figura 10).

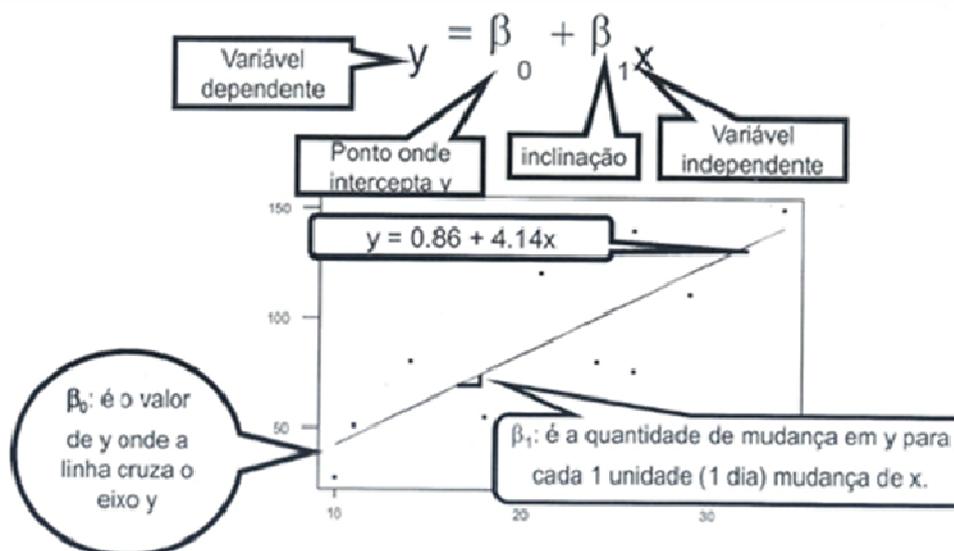


Figura 10 – Exemplo da equação de regressão.

O método estatístico de regressão então adotado para a concepção dos coeficientes de regressão foi do tipo PLS (Partial Least Squares) para compor a fórmula do modelo matemático. Para se usar o MINITAB 15 para a avaliação dos dados numéricos através do método estatístico e obter a formulação matemática, as saídas devem ser transformadas em uma única variável, no caso Gcal de energético necessária ao consumo da UPV conforme PVP, mesmo considerando as várias entradas de combustíveis.

Aplicando o recurso do MINITAB 15, os coeficientes de regressão obtidos são os mostrados na Figura 11.

**PLS Regression: total de sai versus Qtidade GN; Qtidade G.**

Number of components set to: 4

Analysis of Variance for total de saída (Gcal/di

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	4	106120701	26530175	2038,56	0,000
Residual Error	221	2876137	13014		
Total	225	108996838			

Model Selection and Validation for total de saída (Gcal/di

Components	X Variance	Error SS	R-Sq
1	0,40448	26875837	0,753426
2	0,68018	5267141	0,951676
3	0,92626	2988299	0,972584
4	1,00000	2876137	0,973613

Regression Coefficients

	total de saída (Gcal/di	total de saída (Gcal/di standardized
Constant	-539,560	0,000000
Qtidade GN	3,290	0,616032
Qtidade GAF	0,302	0,863624
Qtidade GLD	0,423	0,152963
Qtidade GCO	1,346	0,227321

**Figura 11** – Coeficientes de regressão para composição do simulador.

A formulação matemática para a composição do simulador para um melhor planejamento de consumo de combustível siderúrgico contra um menor volume de gás natural, com vistas na melhoria da gestão da unidade e áreas afins foi a seguinte:

$$\text{Gcal saída} = - 539,560 + \text{GN}.3,29 + \text{GAF}.0,302 + \text{GLD}.0,423 + \text{GCO}. 1,346$$

(Gcal/dia)
(dam<sup>3</sup>/h)

Foi testada a eficácia da formulação aplicando o teste de predição no MINITAB e o mesmo apresentou boa eficiência quando comparado com a prática (Figura 12). Para tanto, a estruturação do simulador de consumo de Gases (GN e GS's) e geração de energéticos (Gcal/h), Eficiência Energética e Custo da Geração de Energéticos de Saída pode ser concebido.



Minitab - Minitab.MPJ - [DADOS CTE.MTW ***]								
	C11	C12	C13	C14	C19	C20	C21	C22
	Otidade GN_1	Otidade GAF_1	Otidade GLD_1	Otidade GCO_1	CLimit2	CLimit3	PLimit2	PLimit3
1	384	10000	1000	400	4681,79	4723,87	4477,02	4928,63
2	384	10000	1000	300	4540,85	4595,54	4341,72	4794,68
3	384	10000	900	500	4770,05	4820,29	4568,95	5021,39
4	384	9000	800	500	4428,22	4474,03	4225,14	4677,11
5	384	9000	1100	500	4553,72	4602,29	4351,87	4804,14

Figura 12 – Teste de predição no MINITAB.

Associando a formulação à necessidade de geração de energéticos da UPV, o protótipo do simulador, considerando o consumo de gases siderúrgicos e GN versus eficiência energética, o mesmo ficou conforme apresentado na Figura 13.

Calcular						
Gcal/h Saída	GN Dam³/h	GAF Dam³/h	GLD Dam³/h	GCO Dam³/h	η	R\$
<b>153,4</b>	<b>16</b>	<b>290</b>	<b>27,17</b>	<b>17,95</b>	<b>31,7%</b>	atraso no ajuste (decisão)

Figura 13 – Protótipo do simulador de eficiência energética da CTE#2.

Como primeiro passo o resultado foi alcançado, porém o grupo vendo a necessidade de associá-lo à necessidade de consumo de energético na UPV, poder calorífico dos combustíveis (PCI médio e padrão), limite de consumo de combustíveis (LS e LI), obteve-se o simulador conforme a Figura 14, o qual foi testado e homologado para a devida utilização.

En. El. Líquida MWh	Vap13 kg/s	Vap31 kg/s	ArSop kg/s	Gcal/h Saída (Energét.)	Travar? jul						
160,0	46,0	2,4	25,0	176,8	η	R\$ dam³/h Comb.					
<b>137,6</b>	<b>27,4</b>	<b>2,0</b>	<b>9,8</b>		<b>30,7%</b>	<b>9.233</b>					
GCAL					LS	30	780	60	28	<b>576 gcal/h</b>	
					LI	9	240	20	0		
PCI Medido											
PCI Padrão					8,664	0,78	1,9	4,35			

Figura 14 – Forma final do simulador de eficiência energética da CTE#2.

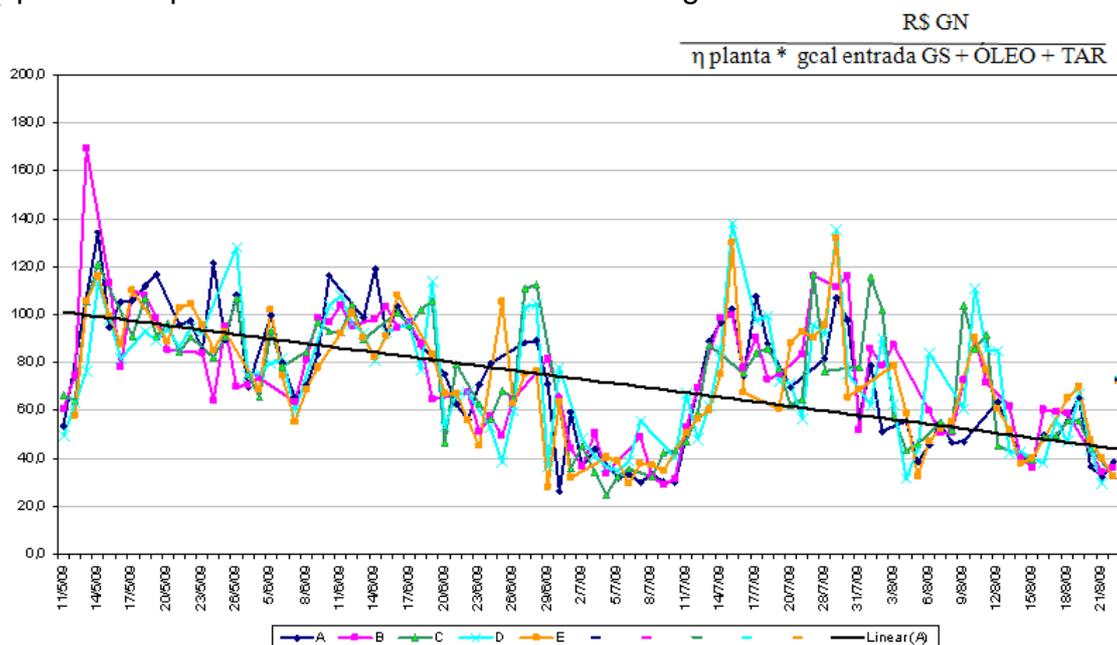
## 5 IMPLANTAÇÃO DO SIMULADOR E RESULTADOS

A equipe de trabalho tendo em mãos o simulador programou reuniões inicialmente de alinhamento de conceitos e diretrizes para a implantação do simulador junto às equipes envolvidas. Mediante as análises dos resultados obtidos, as quais visavam verificar as tendências de maior consumo de gases siderúrgicos em relação ao menor consumo de gás natural, através do estabelecimento de item

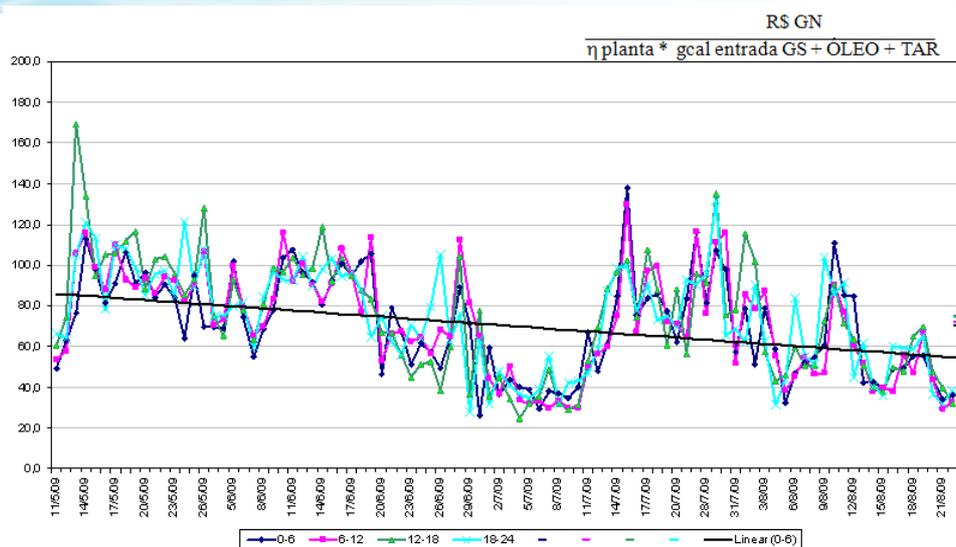
de controle para o desempenho por letra e por turno para o consumo específico de GN, foi observado como resultado preliminar o seguinte:

- resistência ao novo;
- necessidade na equalização de conceitos, informações, práticas operacionais e diretrizes devido à elevada rotatividade;
- análise crítica diária envolvendo as equipes da CTE#2, UG#50 e SICOM, com direcionamento de ações corretivas e preventivas;
- nem todos os operadores experientes são os que dão os melhores resultados;
- ampliação de uma visão mais crítica do processo de geração de energéticos pelo planejamento;
- existência de oportunidades de melhorias nas práticas operacionais para otimização do consumo;
- configurações operacionais na distribuição de combustíveis nos queimadores por análise de novos cenários, ex. busca de críticos ao processo e não meros digitadores;
- análise crítica e *in put* de responsabilidades nos desvios pontuais de GN, por interferências internas e externas ao processo CTE#2; e
- mudança cultural nas equipes e interações entre as mesmas.

Após a concepção do simulador matemático e sua implantação no planejamento e equipe de geração de energéticos realizado no período de maio a agosto de 2009, observou-se uma tendência na redução do consumo específico de GN por letra e por turno conforme mostrado nas Figuras 15 e 16.



**Figura 15** – Desempenho por letra para o consumo específico de GN no período de maio à agosto de 2009.



**Figura 16** – Desempenho por turno para o consumo específico de GN no período de maio à agosto de 2009.

## 6 BALANÇO ECONÔMICO

Mediante os resultados obtidos, esta contribuição técnica representou para a Empresa sob o dimensional custo, com a mudança cultural na equipe de operadores da sala de controle da CTE#2 na geração de energéticos e pela equipe de combustíveis o ganho aproximado pela redução de GN na CTE#2, onde foi levado em consideração os seguintes aspectos: geração de energia elétrica versus consumo médio de GN e a geração de energético de saída em MW/h.

Os ganhos em R\$ com a redução de GN na CTE#2, tomou-se como base de cálculo a geração de energia elétrica e o Consumo médio de GN para 2008 - 182,7 MW/h - 19,8 dam<sup>3</sup>/h e 2009 -149,1 MW/h - 14,4 dam<sup>3</sup>/h, conseqüentemente. Correlacionando, para a geração de 149,1 MW/h em relação a 182,7MW/h, obtivemos: consumo aproximado de 16,2 dam<sup>3</sup>/h; redução de GN de 1,8 dam<sup>3</sup>/h; e ganho anual projetado de aproximadamente R\$ 9,5 milhões /ano (Preço médio considerado de R\$602,00/dam<sup>3</sup> em 2008).

## 8 CONCLUSÃO

A busca de novas soluções com o uso de recursos tecnológicos comprova que com pequeno esforço, intenção da busca pelo novo tem propiciado resultados relevantes no processo produtivo, com ganhos tangíveis expressíveis, sem que houvesse investimentos, a não ser no tempo para implantação das diretrizes estabelecidas pelo grupo e no conhecimento técnico dos métodos estatísticos, no caso, o Método estatístico de regressão para o estabelecimento dos coeficientes de regressão PLS (Partial Least Squares) e o modelo matemático para o simulador da CTE#2, o qual já foi estendido à UG#50.

É interessante ressaltar que outra ação está em processo, na melhoria da eficiência energética de forma mais abrangente, onde se busca resolver problemas afetos à eficiência, atuando no restabelecimento de funções de equipamentos, sistemas, falhas de projeto, evolução tecnológica, desperdícios, elaboração/revisão de procedimentos, o que está contemplado no trabalho com os recursos do *Green Belt* no uso de ferramentas estatísticas e outras.

## BIBLIOGRAFIA

Apostila de Treinamento Seis Sigma CSN 2009.