

# SIMULAÇÃO EM COMPUTADOR DA PRODUÇÃO INTEGRADA DE FUNDENTES NA PLANTA DE ARCOS<sup>1</sup>

*Luigi Guarino Neto<sup>2</sup>  
Ubaldo Marques Silva Filho<sup>3</sup>  
Fernando Cardoso de Sá<sup>4</sup>  
Gustavo Nucci Franco<sup>5</sup>*

## **Resumo**

A mina de calcário da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN, localizada em Arcos (MG), é responsável pelo suprimento dos fundentes consumidos para produção de gusa na Usina Presidente Vargas em Volta Redonda (RJ). Os planos de investimentos da CSN em novas moagens de cimento fazem com que haja uma atenção especial na operação logística em Arcos, da qual se espera um crescimento com competitividade e rentabilidade, sem perder o foco no suprimento de sua maior unidade de negócio: a siderurgia. Assim, foi realizado um estudo da logística integrada de fundentes, o qual utilizou modelos de Simulação em Computador que representam virtualmente as operações em Arcos e os fluxos ferroviários *inbound* e *outbound* entre essa planta, a Usina Presidente Vargas e as moagens do sistema sudeste. Os resultados obtidos com este trabalho foram importantes tanto para o ajuste dos investimentos sendo realizados como para o direcionamento das estratégias da CSN.

**Palavras-chave:** Fundentes; Ferrovia; Simulação em computador; Eventos discretos.

## **COMPUTER SIMULATION OF THE LIMESTONE INTEGRATED PRODUCTION IN ARCOS SITE**

### **Abstract**

The Companhia Siderúrgica Nacional – CSN's limestone mine located in Arcos (MG) is responsible for supplying the pig iron production at the Usina Presidente Vargas in Volta Redonda (RJ) with limestone. Their investment plans in new cement grinders requires special attention to this logistics operation, expecting a growth with competitiveness and profitability, without losing focus on supplying its largest business unit: the steel. Thus, the limestone integrated logistics was studied by Computer Simulation models that virtually represent the inbound and outbound railway operations between this plant, the Usina Presidente Vargas and the southeast system's grinders. The results of this work were as important for adjusting the investments being made as for heading CSN's strategies.

**Key-words:** Limestone; Railway; Computer simulation; Discrete event.

<sup>1</sup> *Contribuição técnica ao 32º Seminário de Logística – Suprimentos, PCP, Transportes, 18 a 21 de junho de 2013, Volta Redonda, RJ, Brasil.*

<sup>2</sup> *Engenheiro civil. Gerente da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>3</sup> *Engenheiro mecânico. Engenheiro da Companhia Siderúrgica Nacional – CSN. São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>4</sup> *Engenheiro mecânico. Engenheiro subcontratado pela Franco Arbeit Engenharia. São Paulo, SP, Brasil.*

<sup>5</sup> *Engenheiro mecânico. Dr. Engenheiro da Franco Arbeit Engenharia. Campinas, SP, Brasil.*

# 1 INTRODUÇÃO

A mina da CSN localizada em Arcos (MG) é uma das maiores reservas calcárias do mundo, enviando cerca de 2 milhões de toneladas anuais de fundentes para Usina Presidente Vargas (UPV) em Volta Redonda. A capacidade excedente de produção em Arcos levou a CSN a implantar um forno de clínquer nessa unidade e duas moagens dentro da UPV, investimento que hoje garante a produção de 2,4 milhões de toneladas anuais de cimento do tipo CP-III.

Seguindo essa tendência de verticalização de sua produção, ganhando em competitividade e rentabilidade, a CSN Cimentos planeja investimentos em um novo forno de clínquer em sua planta em Arcos, o qual, com tecnologia dinamarquesa, será o maior da América Latina e aumentará em 3,5 vezes sua capacidade produtiva de clínquer. Ainda, espera-se que entrem em operação mais 3 moagens de cimento até o final de 2016, sendo 2 dentro da própria planta em Arcos e outra em uma planta avançada na região sudeste.

Com valores chegando à ordem de R\$ 1 bilhão, a CSN deve aumentar sua capacidade de produção de cimento em 125%. Por mais que essa esteja segura do retorno sobre seus investimentos, há uma preocupação com a maneira como as novas operações em Arcos irão afetar o envio de fundentes para UPV.

Diante da complexidade dessa questão, a qual envolve investimentos significativos e pode afetar a produção de gusa, a Simulação em Computador foi adotada enquanto ferramenta capaz de garantir respostas mais confiáveis, apoiando as decisões tomadas pela equipe executora do projeto.

## 2 LOGÍSTICA DA UNIDADE CSN ARCOS

Atualmente, a logística de calcário da CSN movimenta dois tipos de produtos, fundentes e clínquer, mas atende uma única planta, sendo sua diferenciação basicamente no tipo de vagões utilizados e na produtividade das operações (Figura 1).

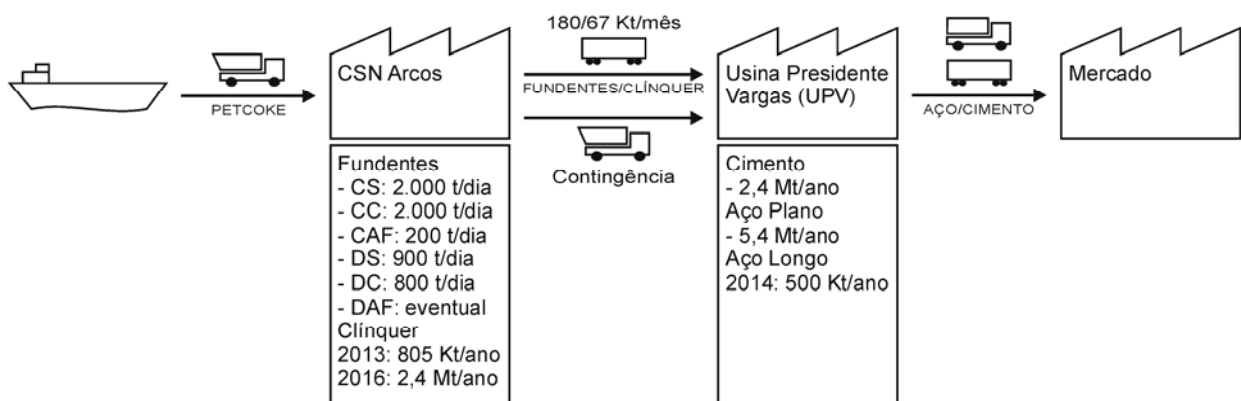


Figura 1 – Logística da unidade Arcos da CSN.

No futuro, essa logística se tornará mais complexa, pois, além do aumento no volume de clínquer carregado para abastecer a moagem avançada, haverá um terceiro produto sendo expedido no mesmo sistema ferroviário: o cimento. Complicador ainda maior, a logística *inbound* de insumos para as moagens de cimento como aditivos, coque de petróleo (*petcoke*) e escória, também deve concorrer pelas linhas da malha ferroviária e da planta de Arcos.

## 1.1 Logística de Fundentes

Com uma produção de 180.000 t/mês, os fundentes enviados para UPV abastecem a calcinação, as sinterizações e os alto-fornos da UPV, sendo um importante insumo para fabricação de 4,6 milhões de toneladas anuais de gusa. O calcário extraído e britado na mina é enviado por esteira para planta de processamento, armazenado em silos e carregado em vagões gôndola de 62,5 toneladas. Composições saem dessa unidade e vão para o pátio ferroviário em Arcos, distante cerca de 12 Km da unidade produtiva.

## 1.2 Logística de Clínquer

Parte do calcário extraído na mina é atualmente levado para um forno que produz 67.000 t/mês de clínquer, produto enviado para UPV em vagões gôndola de 57 toneladas, alimentando duas moagens de cimento. Nos momentos de contingência, são utilizados caminhões que suprem as defasagens do sistema ferroviário, o que aumenta os custos e diminui a rentabilidade do cimento.

Além do calcário, o forno de clínquer consome coque de petróleo, combustível fóssil sólido que se obtém como subproduto da destilação do petróleo (no fundo da coluna de destilação), num processo designado *cracking* térmico. A maior parte do *petcoke* é importada e comprada em navios de até 40.000 toneladas, sendo então transferida para Arcos através de caminhões, fluxo este que deve atender a pranchas de 8.000 a 13.500 t/dia. Alternativamente, o *petcoke* pode ser transportado em vagões gôndola de 40 toneladas.

A instalação de um segundo forno de clínquer garantirá o suprimento de três novas moagens, duas em Arcos e uma na planta avançada localizada na região sudeste. Com capacidade superior a 2 milhões de toneladas por ano, esse novo forno irá aumentar o consumo de *petcoke* em 249,5%.

## 1.3 Logística de Cimento

As duas novas moagens de cimentos em Arcos irão consumir insumos como pozolana, gesso e escória, o que irá gerar contrafluxos rodoviários e ferroviários. Cenários estratégicos apontam que na moagem avançada haverá um forno para fabricação de pozolana, propiciando a logística reversa com o clínquer vindo de Arcos.

A estimativa é de que as duas moagens de Arcos consumam 320 mil toneladas de aditivos por ano. Assim, é fundamental a correta localização da moega de recebimento desses insumos, sem que haja interferência com o carregamento de fundentes.

A expedição de 2 milhões de toneladas de cimentos por ano em Arcos será rodoviária e ferroviária.

## 2 MATERIAL E MÉTODO

Dada a complexidade do problema de instalar novas linhas e produtos em Arcos sem interferir no fluxo de fundentes para Usina Presidente Vargas, o projeto de ampliação foi apoiado por uma ferramenta de Simulação em Computador.

Os objetivos específicos do projeto de modelagem foram:

- mapear os processos logísticos, internos e externos, envolvidos na operação integrada da planta de Arcos com as demais unidades envolvidas em seu processo logístico;
- desenvolver um modelo de Simulação em Computador que represente o fluxo de produtos na malha ferroviária e as operações com vagões na planta de Arcos;
- avaliar a condição atual de malha ferroviária, suas restrições e necessidades de melhorias para garantir o atendimento aos cenários *inbound* e *outbound* de clínquer, fundentes, petcoke, escória e produtos acabados na planta de Arcos;
- conhecer o volume máximo de transporte ferroviário nas condições atuais da malha;
- Definir a configuração física mais adequada às restrições físicas existentes, garantindo a operação integrada da planta de Arcos.

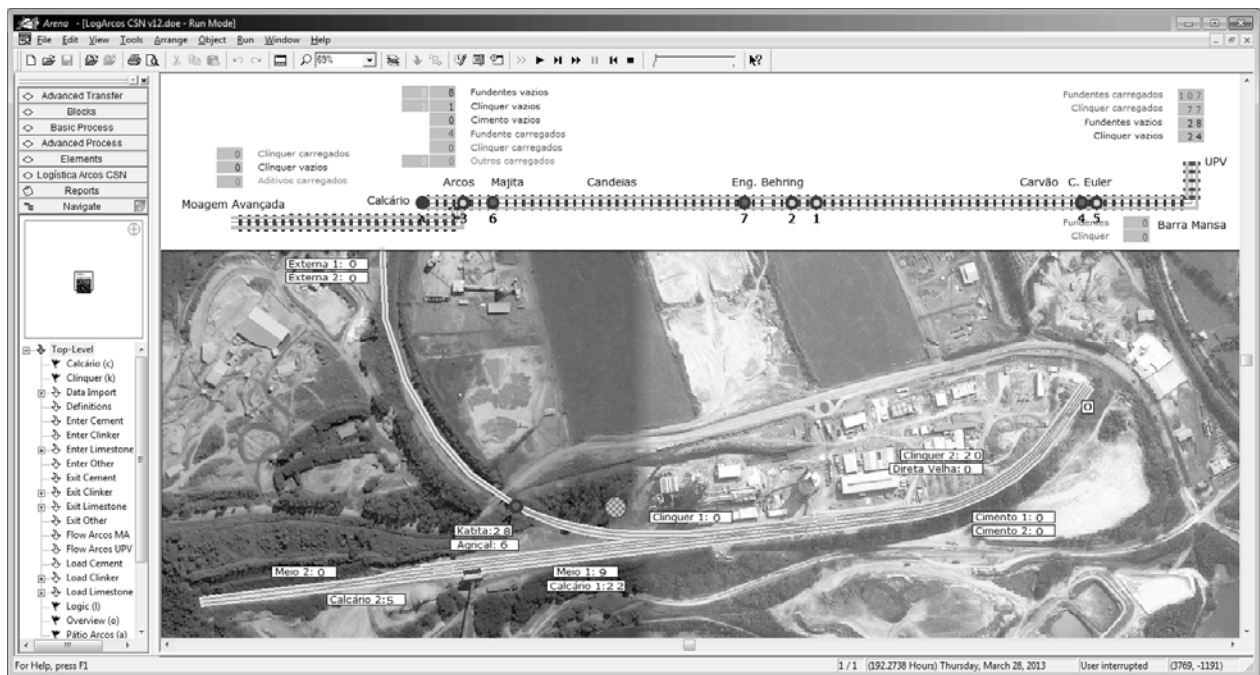
A metodologia empregada envolveu uma análise preliminar através de modelos conceituais baseados no Mapeamento da Cadeia de Valor (VSM). Ainda, as operações atuais foram levantadas e detalhadas, sendo essas traduzidas em mapas visuais que foram validados pelos colaboradores da CSN responsáveis diretos pela operação e serviram de especificação técnica para os modelos computacionais.

## 2.1 Simulação em Computador

O elevado nível de incertezas em projetos de ampliação dessa natureza leva à demanda de análises de risco para apoiar o processo de tomada de decisões. Para cada decisão tomada, existe uma probabilidade de que essa surta os resultados planejados, havendo assim riscos de perdas e potenciais de ganhos. E, quanto maior a complexidade do sistema, com diversos parâmetros que interagem de uma maneira que nem sempre pode ser representada analiticamente, mais indicada é a utilização da Simulação em Computador.

Uma vez definido que um modelo é uma aproximação do mundo real, pode-se simplesmente dizer que simular significa submeter esse modelo a repetidas observações.<sup>(1)</sup> Quando esse modelo é uma representação do sistema real através de uma linguagem computacional, chega-se a simulação em computador. De uma maneira ainda mais específica para a metodologia aqui apresentada, a Simulação de Eventos Discretos é utilizada para modelar sistemas que mudam de estado em pontos discretos no tempo,<sup>(2)</sup> tal qual em um processo de carregamento de vagões.

Para este projeto, foi selecionado o aplicativo comercial Arena da Rockwell Software para a modelagem e simulação da logística ferroviária em Arcos (Figura 2). O modelo foi desenvolvido sobre uma animação bi-dimensional, a qual foi desenhada numa janela dividida em duas partes para garantir uma visualização completa do modelo em uma vista única. Foi colocado na parte superior da janela um modelo esquemático da malha ferroviária e, na parte inferior, uma vista geral da usina baseada em uma foto de satélite. Valores numéricos foram dispostos na janela para apresentar variáveis como número de vagões em pátios e linhas.



**Figura 2 – Visão geral do modelo de simulação.**

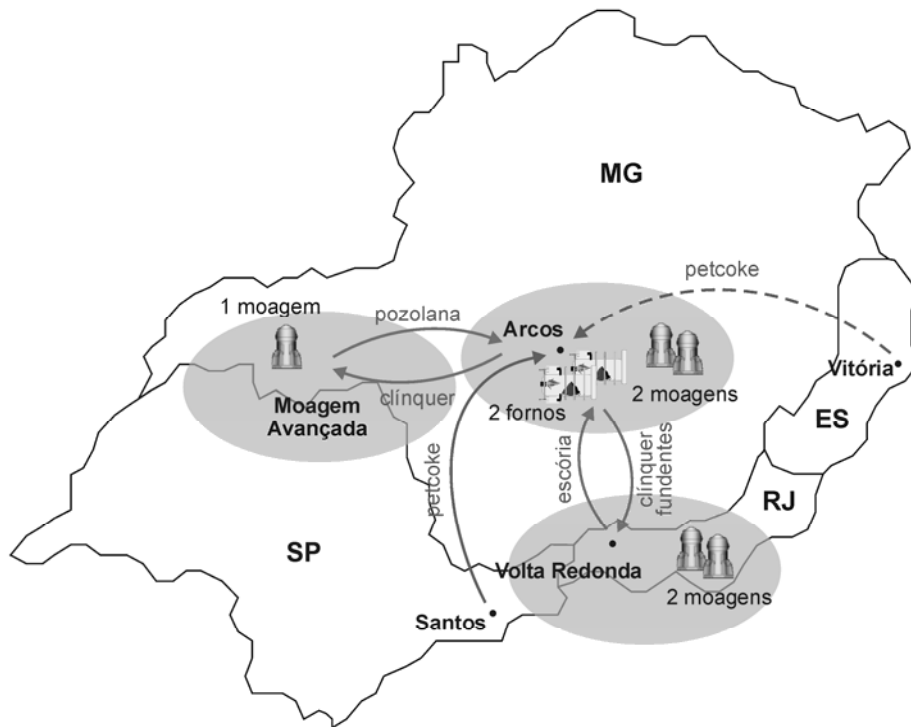
A utilização de ferramentas de simulação se torna eficaz à medida que é possível identificar as variáveis mais importantes de um sistema, aquelas que realmente são significativas para o alcance de seus objetivos. Normalmente representadas por variáveis aleatórias que descrevem seu comportamento de maneira mais próxima do real, identificar essas variáveis faz com que os analistas possam focar nesses pontos e busquem soluções ótimas durante o projeto.

Durante a etapa de experimentação, são testadas diferentes configurações alternativas para o projeto. Sem que haja impactos financeiros, como em testes com protótipos reais, novas idéias são inseridas no modelo e seu resultado simulado pode ser apresentado e comparado para determinar sua viabilidade. Ainda, essas configurações podem ser submetidas a diferentes cenários (e.g. programações de produção distintas), aumentando ainda mais a segurança na escolha de quais configurações melhor atendem às demandas do projeto mesmo diante diferentes situações. Assim, as configurações mais adequadas podem ser selecionadas com confiabilidade.

## 2.2 Modelo de Fluxo Ferroviário

Com foco na logística ferroviária, este projeto envolveu a modelagem computacional dos seguintes fluxos (Figura 3):

- transporte de fundentes de Arcos para Volta Redonda;
- transporte de clínquer de Arcos para Volta Redonda;
- recebimento de escória em Arcos;
- transporte de clínquer de Arcos para moagem avançada;
- transporte de pozolana da moagem avançada para Arcos; e
- recebimento de petcoke (Santos ou Vitória).



**Figura 3** – Logística ferroviária de fundentes, clínquer e cimento.

Para atender ao objetivo de avaliar as restrições da malha ferroviária, foram levantados os tempos de ciclo das composições em cada um desses fluxos. Embora não seja objetivo deste projeto modelar a malha ferroviária em si, determinando seus limites dadas as condições operacionais das linhas em cada região e as dimensões de seus pátios de cruzamento, as principais estações foram consideradas no modelo.

A Figura 4 mostra a parte da planilha de entrada de dados referente ao fluxo no trecho de Arcos para Volta Redonda, sendo possível alterar: (1) o número de composições por fluxo, (2) o tamanho de cada tipo composição e (3) o tempo de ciclo entre as diversas origens e destinos. Com essa flexibilidade, mesmo sem um modelo mais detalhado para a malha ferroviária, foi possível analisar a relação entre a capacidade de transporte da operadora logística com os parâmetros de transporte.

FLUXO Arcos - Volta Redonda				
	Composições		Viagem [h]	
	min	max		
CSN Arcos - FCA Arcos	1			
FCA Arcos - CSN UPV	7			
	Composição [vagões]			
	min	max		
CSN UPV > Pátio FCA Arcos	36	36	26,6	
FCA Arcos > CSN Arcos	24	40	1,0	
CSN Arcos > Pátio FCA Arcos	28	28	1,0	
FCA Arcos > CSN UPV	36	36	30,0	
Cimento	12	12		
FCA Arcos > CSN Avançado	50	50	24,0	
FCA Arcos > Porto	38	38	24,0	

**Figura 4** – Exemplo da planilha de entrada de dados.

## 2.3 Modelo de Manobras Ferroviárias

Parte fundamental para a avaliação de recebimento e expedição ferroviários, o sistema computacional contou com um modelo detalhado de manobras na planta de Arcos. As linhas e os aparelhos de mudança de via (AMV's) existentes, projetados e sugeridos foram modelados com base no layout CAD fornecido pela CSN. O modelo considera uma certa quantidade de vagões de cada tipo e cada linha possui restrições quanto à quantidade de vagões que podem ser estacionados, limitando as manobras tal qual essas ocorrem no sistema real.

Na Figura 5 é possível ver como essas restrições são apresentadas na planilha de entrada de dados do modelo.

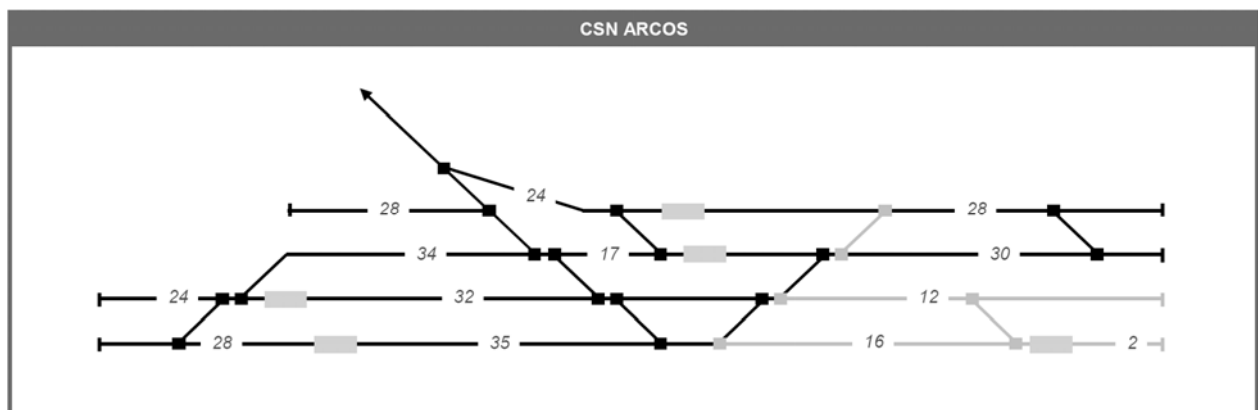


Figura 5 – Capacidade das linhas.

Ao chegar à planta de Arcos, uma composição vazia de fundentes ou clínquer tem que aguardar a disponibilidade das linhas para que possa ser manobrada. Essa é então movimentada pelas locomotivas da operadora até as linhas específicas para vagões vazios. Para tanto, o modelo guia a composição pelas chaves, verificando a necessidade de eventuais manobras de inversão e seguindo tempos próximos aos observados no pátio real.

Quando a linha de carregamento está disponível, os vagões vazios são novamente manobrados pela locomotiva interna até os pontos de carregamento nos silos de fundentes ou clínquer. Os vagões são carregados um a um, seguindo os tempos de carregamento levantados para cada produto. Uma vez carregada, a composição é manobrada pela locomotiva interna até as linhas de espera para o atendimento da operadora, sempre seguindo as restrições de movimentações das linhas.

Além da velocidade média e de tempos de manobra (e.g. tempo de inversão de chave), o engate e desengate de composições durante encostes e retiradas são sempre considerados. O mesmo acontece com a pesagem e preparação dos vagões (e.g. verificação e limpeza), tempos esses considerados sempre que afetam a operação da planta. Seguindo o atendimento da operadora, sua locomotiva é deslocada até a planta de Arcos para retirada dos vagões carregados, disponibilizando-os no pátio ferroviário de Arcos para formação de uma composição que será transportada para Volta Redonda.

Esse mesmo conceito foi estendido para os demais fluxos, como recebimento de insumos e expedição de cimento. Mantidas as restrições das linhas da planta, foi possível determinar restrições e propor soluções que garantam o atendimento das metas de expansão.

### 3 RESULTADOS

Uma vez que as operações de transporte na malha ferroviária (fluxo) e as manobras na planta de Arcos foram modeladas, experimentos foram realizados. Inicialmente, foi gerado um cenário que representasse a situação atual para que o modelo fosse validado através da comparação dos resultados simulados com aqueles hoje observados na logística ferroviária de calcário. Em seguida, foram implementados e simulados cenários futuros, divididos em fases para facilitar a comparação das análises com os planos de investimentos da CSN.

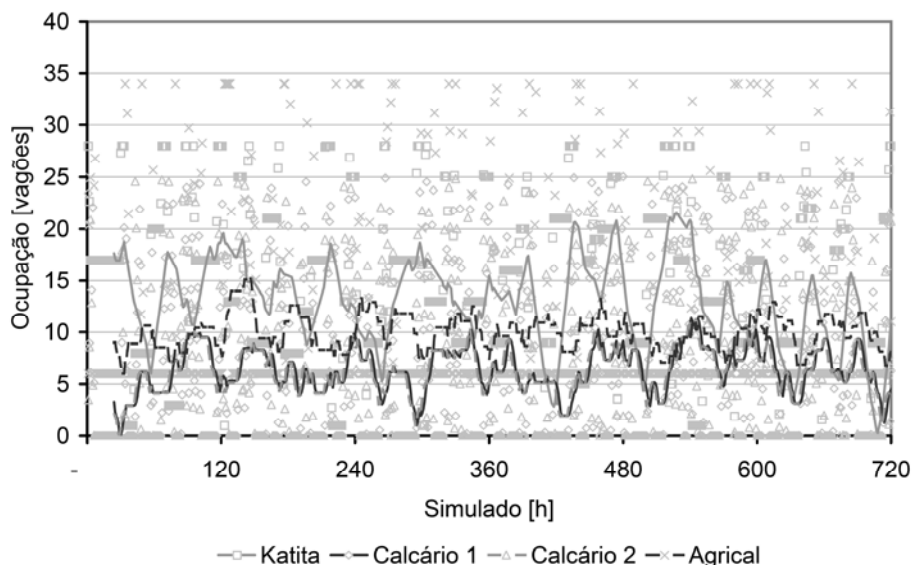
#### 3.1 Cenário Atual

O cenário atual foi simulado numa configuração sem que houvesse alterações nas linhas da planta de Arcos, realizando, assim, as manobras tais quais essas acontecem hoje. O mesmo foi adotado para o número total de vagões, número de composições e tamanho dessas. Os volumes programados foram de 144 Kt/mês de fundentes e 36 Kt/mês de clínquer, o qual, embora seja abaixo da meta estabelecida, está de acordo com o atualmente realizado.

Ao realizar uma simulação de 720 horas, os resultados tratados estatisticamente mostram que a demanda programada foi atendida, conforme esperado. Dentre as medidas de desempenho disponibilizadas pelo modelo, destaca-se:

- Produtividade das operações de carregamento [t/h];
- Carregamento total alcançado [t];
- Nível de utilização das composições [%];
- Taxa de ocupação dos pátios [vagões];
- Taxa de ocupação das linhas [vagões];
- Tempo de ciclo detalhado [h].

O desempenho desses índices pode ser analisado ao longo do tempo, uma vez que cada simulação disponibiliza um conjunto de informações detalhadas sobre o comportamento de cada medida. Como exemplo, é possível observar na figura 6 a ocupação média das linhas Katita, Calcário e Agrical ao longo do tempo de simulação. Os pontos mostram as médias dessas medidas de desempenho a cada hora e as linhas são a média móvel para as últimas 24 horas.



**Figura 6** – Ocupação simulada de linhas para o cenário atual.



No entanto, ao aumentar a demanda para as metas atuais de 180 Kt/mês de fundentes e 67 Kt/mês de clínquer, problemas limitam o fluxo de vagões. Dos 4.032 vagões programados para o período de 720 horas simuladas, o modelo consegue movimentar apenas 3.092, ficando 23,3% abaixo da meta. Analisando-se os resultados simulados, é possível observar que há restrições no transporte ferroviário entre Arcos e Volta Redonda devido a problemas das linhas da malha ferroviária, falta capacidade dos pátios de cruzamento e dimensionamento inadequado de composições, o que limita o alcance do fluxo almejado.

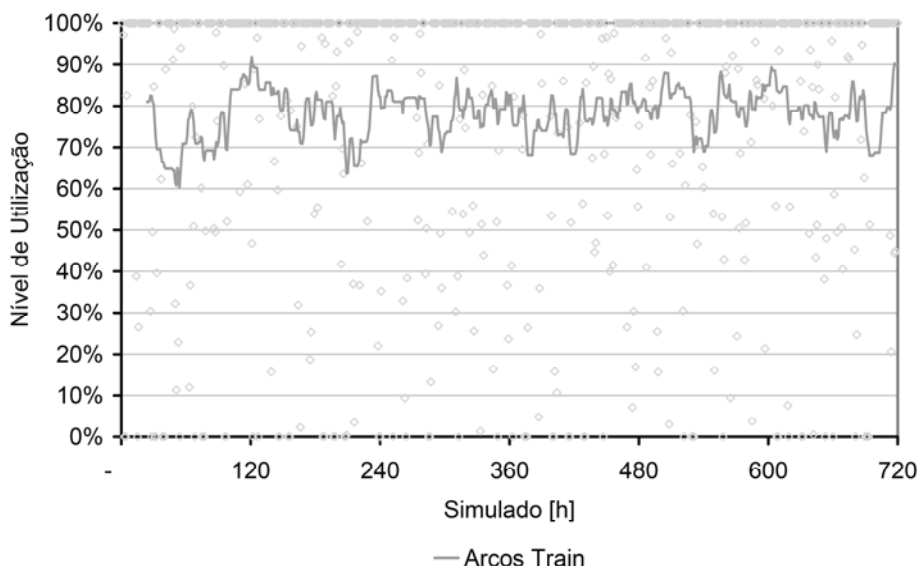
A simulação de cenários alternativos, alterando-se as composições que fazem o transporte de Arcos para Volta Redonda, apontou para duas variáveis a serem observadas com atenção: (1) o número de composições e (2) o tamanho das composições. No entanto, o simples aumento do número de composições pode aumentar a interferência entre essas, aumentando também o tempo de ciclo de transporte e reduzindo sua eficiência. Ainda, deve-se observar que atualmente não há pátios de cruzamento que comportem composições maiores suficientes para garantir a melhora do fluxo ferroviário. Assim, mesmo que o modelo não contemple o fluxo detalhado, é possível concluir quais investimentos na malha ferroviária se fazem necessários.

### **3.2 Análise dos Cenários de Expansão**

Uma vez validado, experimentos foram realizados no modelo para o teste dos cenários de expansão futuros. Esses cenários foram divididos de acordo com o plano de expansão da CSN, levando aos investimentos necessários na logística ferroviária ao longo do tempo.

Analisando-se os resultados desses cenários, nota-se que não é possível carregar fundentes e clínquer e expedir cimento quando o segundo forno de clínquer entra em operação junto com as duas moagens de cimento, mesmo antes da operação da moagem avançada. Dos 5.693 vagões programados, o modelo conseguiu movimentar apenas 5.116, ficando 10,1% abaixo da meta.

Esses resultados apontam que há restrições no fluxo entre o pátio ferroviário em Arcos e a planta em Arcos, conforme os resultados da Figura 7. Essa composição apresentou um nível de utilização médio de 78,1% ao longo de todo período simulado, mas esse valor ficou acima de 95% em 62,5% das horas medidas. Esses momentos de pico, observados no gráfico pelo acúmulo de pontos com 100% de utilização, apontam para gargalos que impedem o cumprimento das metas.



**Figura 7** – Utilização da composição entre o pátio e a planta Arcos sem investimentos na logística ferroviária.

### 3.3 Análise de Cenários Alternativos

Identificados os problemas, cenários alternativos foram desenvolvidos pela equipe executora deste projeto, os projetistas da CSN e a operadora logística. A simulação desses cenários aponta para as soluções mais viáveis e redirecionou as equipes de projetos.

Uma dessas soluções é a criação de um pátio externo de vagões à planta de Arcos, o qual foi denominado Buffer Externo, juntamente com uma nova locomotiva para a realização dedicada das manobras internas. Esse cenário melhora os problemas relacionados à restrição do fluxo entre o pátio ferroviário em Arcos e planta de Arcos, levando o sistema a resultados próximos das metas. Nesse, foram carregados 5.810 vagões, apenas 5,4% abaixo do programado. As simulações mostram que as manobras na planta de Arcos são restritivas, chegando o nível de utilização da locomotiva interna a 85,2%.

Apesar dessa restrição, há que se observar que essa proposta representa um custo menor, já que esse *buffer* pode ser implantado em linhas que já existem numa área próxima à planta de Arcos.

A melhor solução apontada foi, em complemento ao pátio externo de vagões, a implantação de uma Pêra Ferroviária para o descarregamento de escória e o carregamento de fundentes em um ponto externo à planta de Arcos. Com isso, parte significativa das manobras deixaria de ser feitas dentro da planta de Arcos, facilitando a movimentação dos demais materiais.

Esse cenário foi testado diante do cenário da Fase 2 com Moagem Avançada, sendo que, no período simulado de 720 horas, foram carregados 210,2 Kt de fundentes, 137,1 Kt de clínquer e 58,8 Kt de cimento. Ainda, houve o descarregamento de 54,9 Kt de aditivos.

Criando um fluxo constante entre o pátio ferroviário e a planta em Arcos, é importante destacar que a pêra ferroviária possui uma capacidade de carregamento de fundentes maior do que a demandada, podendo seu excedente ser utilizado em uma possível nova unidade siderúrgica da CSN. Sendo sua atual restrição meramente na operação de carregamento, pode-se inferir pela simulação que aumentos da ordem de 170 Kt/mês são possíveis apenas com a linha projetada.

## 4 DISCUSSÃO

A preocupação de que os planos de expansão da CSN para sua planta em Arcos é válida e se justificou a utilização da Simulação em Computador para analisar as restrições e testar novas soluções. Concorrendo com a logística de fundentes, importante insumo para produção de aço, o principal negócio da empresa, o retorno esperado sobre seus investimentos somente irá se concretizar se houver melhorias na malha ferroviária.

Para chegar a essa conclusão, este projeto levantou dados de tempos de ciclo da operadora da logística ferroviária e a simulação desses valores no modelo apontou para inúmeras restrições que afetam o alcance de metas maiores. A análise conjunta da equipe de executores do projeto apontou os seguintes pontos de atenção:

- Há problemas estruturais nas linhas férreas que afetam a confiabilidade da operação e diminui a eficiência do transporte (e.g. falta de pátios de cruzamento e raios inadequados em alguns trechos de linhas).
- A baixa confiabilidade dos recursos no transporte de Arcos para Volta Redonda faz com que haja restrições no tamanho das composições, o que demandaria mais locomotivas e aumentaria o risco de quebras.
- As ineficiências no transporte do pátio Arcos para a planta Arcos faz com que uma viagem de 12 Km seja realizada em elevados 60 minutos.
- Há um gerenciamento inadequado das necessidades da CSN por parte da operadora logística, sendo disponibilizados mais vagões de fundentes do que de clínquer.

## REFERÊNCIAS

- 1 BANKS, M. C. What Is Modeling and Simulation? In: *Principles of Modeling and Simulation: a multidisciplinary approach*. p 3-23. Edited by J.A. Sokolowski & C.M. Banks. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons. 2009.
- 2 ROBINSON, S. *Simulation: The Practice of Model Development and Use*. 340 pp. West Sussex, England: John Wiley & Sons. 2004.