

# USO DE SIMULAÇÃO PARA DECISÕES DE INVESTIMENTO<sup>1</sup>

Carlos Augusto de Oliveira<sup>2</sup>  
Márcio Rogério Ribeiro<sup>3</sup>

## Resumo

Este trabalho visa apresentar como a metodologia de simulação pode ser aplicada na tomada de decisões de aumento de capacidade, avaliação de layout, dimensionamento de equipamentos e otimização de regras de operação do complexo: forno elétrico, forno panela e máquina de lingotamento contínuo. Em sistemas dinâmicos, como o do complexo acima, devido aos altos valores de investimentos envolvidos e a complexidade do sistema, métodos de análise avançados são indicados. Os Investimentos nestes equipamentos não devem ser decididos pelos seus efeitos locais isolados. A forte variabilidade e interdependência do complexo o caracteriza como um sistema de regulação por feedback. Este problema é caracterizado como *tandem queue*. Simulação é um método que traz informações essenciais, que não podem ser obtidas por outras vias, principalmente aquelas relativas ao comportamento dinâmico do sistema. Aplicou-se com sucesso em uma empresa orientando as decisões para aumento de capacidade, chegando-se a soluções de expansão que apresentam melhor relação custo-benefício e que incorporam estabilidade ao sistema. As soluções encontradas se diferenciaram daquelas inicialmente propostas pela empresa.

**Palavras-chave:** Expansão de capacidade; Simulação; Investimento; Aciaria.

## STEEL MAKING SIMULATION FOR CAPACITY INCREASE DECISION

### Abstract

This paper aim to present how the simulation methodology may be applied in the capacity increase decision making, plant layout evaluation, equipments dimensioning, testes and selection rules for the complex: electric arc furnace, ladle treatment furnace and continuous casting machine. In a dynamic system like this, due to the high value investments involved and the complexity of the system, advanced methods of analysis are indicated. The investments in these equipments couldn't be decided based only in it's stand-alone and locally effect. The high variability and interdependency of the complex components make it as a feedback regulation system. That's why this problem is known as tandem queue. For dynamic evaluation of a system like the described, simulation is a method that gives essential information that couldn't be obtained through other different methods. The simulation successfully accomplished the goal to assign the set of investments for capacity increase while balancing the cost-benefit relation and the system stability. The solution reveled by the simulation is different from that initially supposed for the company.

**Key words:** Capacity planning; Simulation; Investment; Steel plant.

<sup>1</sup> Trabalho apresentado no XXXVII Seminário de Aciaria - Internacional, 21 a 24 de maio de 2006, Porto Alegre, RS

<sup>2</sup> Carlos Augusto de Oliveira, engenheiro mecânico e mestre em pesquisa operacional.

<sup>3</sup> Márcio Rogério Ribeiro, engenheiro civil, especialista em simulação.

## INTRODUÇÃO

Com o objetivo de selecionar os investimentos necessários ao aumento gradual de produção de uma aciaria elétrica, fez-se o presente trabalho.

Dentre um conjunto de investimentos possível, o desafio era eleger os que levariam à melhor relação custo benefício.

Alguns fatores cruciais de eficiência do complexo são o rendimento metálico, a produtividade e a frequência de quebras na seqüência de lingotamento. Para isto, a máquina de lingotamento contínuo procura evitar perda de seqüência através de ajuste de velocidade em função das condições instantâneas atuais do forno elétrico e do forno panela. A velocidade escolhida de lingotamento é baseada em previsão de tempo até que as próximas corridas alcancem a MLC – Máquina de Lingotamento Contínuo. Sempre que há pouco ou muito aço a montante a primeira providência é ajustar a velocidade de lingotamento da corrida respeitando a tolerância do aço. Se este ajuste não é suficiente para restaurar o equilíbrio do sistema, então a máquina de lingotamento fará fechamento ou abertura de veios ou, quando impossível, parar a seqüência de lingotamento.

Uma outra situação influente é a regulação a montante. Quando o forno elétrico adianta muito na produção, tende há provocar longas esperas para a entrada no forno panela que então irá requerer mais tempo para aquecer e tratar a corrida de aço o que pode num futuro próximo prejudica a seqüência da MLC.

No caso estudado, existe a particularidade de coexistirem “2 aciarias” em um mesmo galpão, pois há 2 fornos elétricos, 2 fornos panela, 2 máquinas de lingotamento contínuo, 2 pontes rolantes e 1 região de preparação e aquecimento de panelas. Há também um único pote de escória para despejo do resíduo após término do lingotamento.

Essa coexistência gera conflitos, como interferência entre as pontes rolantes e disputa pelo uso de panelas.

Considerando-se uma das linhas de produção, o equilíbrio do sistema é obtido pela velocidade de liberação de panelas pelo FEA – Forno Elétrico a Arco – e pelo controle da velocidade de lingotamento da MLC, sendo o FPAN – Forno Panela – utilizado às vezes como buffer.

As máquinas de lingotamento controlam o fluxo, aumentando ou diminuindo a velocidade para manter a seqüência, sendo a velocidade totalmente dependente do tipo de aço que se lingota. Também há a possibilidade de se fechar ou abrir veios para se atingir a velocidade desejada.

Uma das MLCs lingota tanto aços com jato protegido quanto aberto, e a outra lingota apenas com jato aberto.

Um veio pode ser fechado intencionalmente, como exposto, para se garantir a seqüência, ou por falha. O veio, uma vez fechado, tem sua reabertura - que é possível somente em aços lingotados com jato aberto - quando o acúmulo de aço a montante justifica, não sendo possível reabri-lo antes que se passem duas corridas pela MLC a partir de seu fechamento. A decisão de se interferir nos veios é a última a ser tomada para se garantir o seqüenciamento, pois implica perda de produção, principalmente quando se lingota com jato protegido, já que nesse caso o veio somente é reaberto na próxima seqüência de corridas.

## MÉTODOS E MATERIAL

As principais metodologias aplicadas foram simulação Monte Carlo, projeto de experimentos e sistemas de controle e gestão. A simulação reproduz por meio de um modelo todo o fluxo das transações ativas, como por exemplo, uma panela de aço, e as entidades passivas ou servidoras, como os equipamentos, respeitando a lógica de operação, os tempos, as filas, os depósitos e suas capacidades, os habilitadores e suas características, permitindo observar a interação entre estas entidades através da operação simulada muito próxima das condições reais.

O método consistiu-se na construção de um modelo que permitisse resumir a funcionalidade da aciaria em estudo numa quantidade pequena de variáveis aleatórias de maneira a facilitar a compreensão pelos envolvidos.

O modelo é estocástico, já que tem variáveis aleatórias como entrada, essas entradas levam a saídas aleatórias, as quais podem ser consideradas estimativas das verdadeiras características.

A simulação utilizada é de sistemas dinâmicos de eventos discretos; dinâmico porque o sistema é estudado ao longo do tempo, e discreto, pois a passagem do tempo é feita aos saltos, entre um evento e outro, por isso é também chamada de simulação de eventos discretos. <sup>(1)</sup>

Nesse trabalho, utilizaram-se os passos de um estudo de simulação sugeridos por Law & Kelton. <sup>(1)</sup> Os passos são detalhados a seguir:

1. Formulação do problema e planejamento do estudo
2. Coleta de dados e definição do modelo
3. Validação do modelo conceitual
4. Construção do programa computacional e verificação
5. Realização de execuções piloto
6. Validação do modelo programado
7. Projeto dos experimentos
8. Realização das execuções de simulação
9. Análise de resultados
10. Documentação e implementação dos resultados

Simulou-se o sistema considerando os FEAs, a partir do vazamento da corrida, os FPANs e seu processo, as MLCs, com o seqüenciamento e os equipamentos de apoio, como as pontes rolantes e a região de refratários, para várias famílias de aços.

A simulação compõe-se de duas partes: uma lógica, programada com o software GPSS/H – General Purpose Simulation System –, e outra animada realizada com o software Proof Professional. Ambos softwares são marcas registradas da empresa WOLVERINE SOFTWARE CORPORATION<sup>TM</sup>

Realizaram-se as análises dos dados de entrada e saída com os softwares MINITAB 14 e Excel.

No dia da apresentação deste trabalho, será mostrada a animação da simulação.

## RESULTADOS

Para o incremento da capacidade produtiva, a empresa criou várias alternativas de investimentos baseadas em:

- Redução do tap to tap dos fornos elétricos – vários projetos atacando o power-on e o power-off, obtendo quatro níveis de tap to tap.
- Aumento de velocidade da máquina de lingotamento.
- Automatização do stiring – conexão automática de mangueira na panela.
- Conservação de calor com tampas automáticas das panelas nas torres.
- Aquecimento da panela enquanto aguarda a corrida do forno – carro pré-aquecedor.
- Mudança do layout do hall da aciaria.
- Aumento do peso da corrida através de reespecificação de refratários.
- Decomposição da função do forno panela em duas estações uma para aquecimento e outra para o tratamento do aço – estação de trimming.
- Mudança do portfólio de produtos com eliminação de produtos com alto tempo de preparação ou baixa produtividade.
- Outros pequenos investimentos na área de preparação de panela.

As Tabelas 1 e 2 apresentam resumidamente os investimentos e os níveis em que foram experimentados.

**Tabela 1. Variáveis de 2 níveis**

Num.	Variáveis - Descrição	No Experimento	Nível 1 (baixo)	Nível 2 (alto)
1	Lay Out	Layout	Atual	2 zonas de refratários (1 para cada FEA)
2	Velocidade de lingotamento	Vcol	Atual (120x120)	Aumentada com Seção 160x160
3	Carro do FEA com pré-aquecedor de panelas	CarPre	Sem	Com
4	Conexão automática de stiring na panela	Stirr	Sem	Com
5	Tampa automática na MLC	TampaAut	Sem	Com
6	Probabilidade de Fly Tundish	Prfly	Atual	Aumentada : (MLC1 = 66% e MLC2 = 80%)
7	Duração da troca de tampão poroso	Ttapon	Atual (50 minutos)	Reduzido (25 minutos)
8	Frequência da troca de tampão poroso	FrTapon	Atual (1 troca a cada 12 cor.)	Reduzido (1 troca a cada 20 cor)
9	Tempo de processo no FPAN	TLF	Atual	Reduzido (Atual - 10 minutos)
10	Probabilidade de perder veio em jato protegido	PrBS	Atual	Menor (-30%)
11	Estação de trimming	Trim	Sem	Com (XYZ / ABC / DJL)
12	Probabilidade de corte acidental da MLC	PrMLC	Atual	MLC1 (-50%)

**Tabela 2. Variável de 4 níveis**

Num.	Variável - Descrição	No Experimento	Composição (min)	Nível 1	Nível 2	Nível 3	Nível 4		
				FEA1 e FEA2	FEA1 e FEA2	FEA1 e FEA2	FEA1	FEA2	
13	Tap To Tap	Tap	Tempo de Fusão	46	42	36	40	32	Tempos Fixos
			Tempo Tecnológico	8	5	4	4	4	
			Demoras Aleatórias no FEA	7	5	3	5	3	Tempos Variáveis
Tempo Médio de Tap to Tap	61	52	43	44					

As alternativas de investimentos são tratadas como variáveis no projeto de experimentos, que foi realizado utilizando-se o método Taguchi.

Após construção do modelo da situação atual e validação pela equipe da empresa, iniciaram-se mudanças neste modelo de maneira que contemplassem as alternativas de investimentos acima, podendo ser inseridos em conjunto ou separadamente, ajustando os métodos de trabalho, parâmetros do sistema, as regras etc.

Os critérios para avaliação do projeto foram: produtividade, estabilidade e valor do investimento. Preparou-se a simulação para ser capaz de analisar as alternativas para atender esses critérios.

Como saídas da simulação, apresenta-se a Tabela 3, que mostra o ciclo produtivo da aciaria, marcando todos os eventos ocorridos com a corrida.

**Tabela 3.** Rastreamento das operações da aciaria

Família	Painela	FEA							FPAN				MLC						
		Hora Vazamento	Tap To Tap (min)	Esperas (min)				Produção (ton/h)	Tempo Anterior (min)	Hora Início FPAN	Hora Fim FPAN	Hor Pre Q/ ch	Tap To Tap (min)	Produção (ton/h)	Tempo do Aço na Painela (min)	Velos Lingotando	PERDIDAS (+) Perdida (-) Voltou	SEQUENCIA (+) Fechou (-) Voltou	
				Esperas Totais	Ponte	Refratários	MLC												
AC	1	0,66	42,08	0,00	0,00	0,00	0,00	142,59	24,6	1,07	1,64			36,60	163,93	128,40	6,0	0	0
AC	2	1,34	40,68	0,00	0,00	0,00	0,00	147,49	29,4	1,83	2,58			43,80	136,99	133,20	6,0	0	0
AC	3	2,02	41,23	0,00	0,00	0,00	0,00	145,53	46,2	2,79	3,36			54,00	111,11	148,20	5,0	1	0
AC	4	3,05	61,39	0,21	9,52	0,00	3,09	97,74	34,2	3,62	4,31			51,00	117,65	139,20	5,0	0	0
AC	5	3,97	55,4	0,20	6,43	0,00	5,80	108,30	36	4,57	5,21			54,60	109,89	140,40	5,0	0	0
BC	747	680,64	72,92	0,40	9,22	14,61	0,00	82,28	15	681	681,5			70,20	85,47	135,00	4,0	0	2
BC	748	681,73	65,39	0,40	6,69	17,26	0,00	91,76	24	682	682,7			56,40	106,38	127,80	4,0	0	0
BC	749	682,54	48,59	0,02	1,33	0,00	0,00	123,48	25,2	683	683,7			54,60	109,89	135,00	4,0	0	0
BC	750	683,53	59,72	0,30	0,00	17,75	0,00	100,47	20,4	684	684,6			54,00	111,11	130,80	4,0	0	0
BC	751	684,34	48,38	0,09	5,28	0,00	0,00	124,02	26,4	685	685,5			54,00	111,11	138,00	4,0	0	0
BC	752	685,18	50,64	0,12	0,00	0,00	7,08	118,48	31,8	686	686,5			60,00	100,00	149,40	4,0	0	0
BC	753	686,11	55,75	0,18	0,00	0,00	11,04	107,62	31,8	687	687,4			55,80	107,53	151,20	4,0	0	0
BC	754	687,34	73,83	0,49	7,35	22,26	0,00	81,27	19,2	688	688,5			54,00	111,11	133,20	4,0	0	0
BC	755	688,35	60,1	0,33	0,63	19,03	0,00	99,83	19,2	689	689,4			54,00	111,11	128,40	4,0	0	0
BC	756	689,17	49,49	0,03	1,99	0,00	0,00	121,24	24	690	690,3			54,00	111,11	135,00	4,0	0	0
BC	757	689,98	48,5	0,09	0,00	0,00	5,24	123,71	31,2	691	691,2			54,60	109,89	142,20	4,0	0	0
BC	758	690,91	55,75	0,24	2,91	0,00	11,24	107,62	31,2	691	692,2			54,00	111,11	141,60	4,0	0	0
BC	759	691,84	55,75	0,23	2,69	0,00	11,24	107,62	31,2	692	693,1			54,00	111,11	141,60	4,0	0	0
BC	760	692,77	55,75	0,13	0,00	0,00	8,08	107,62	31,2	693	694			54,00	111,11	141,60	4,0	0	0

O forno elétrico, pela dinâmica do processo, muitas vezes necessita esperar a ponte, o FPAN ou a MLC, isso produz os valores de espera apresentados na tabela 01. As esperas significam atrasos de produção de corridas pelo FEA.

Como resultado dos experimentos, apresentam-se os gráficos das Figuras 1 e 2, que trazem os efeitos das variáveis na produção nos níveis 1, baixo, e 2, alto.

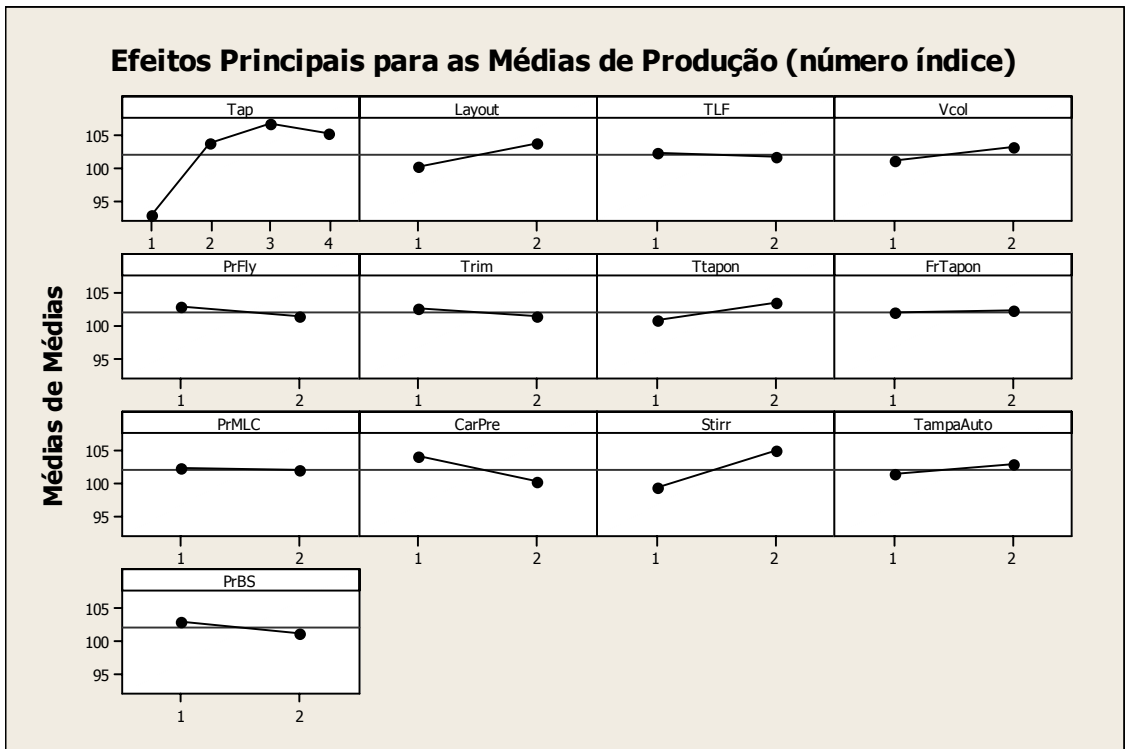


Figura 1. Efeitos dos níveis das variáveis sobre a produção

Nota-se que vários investimentos não tiveram efeito médio na produção. Como exemplo, vê-se que a estação de trimming tem efeito desprezível quando vista isoladamente. Mas seu efeito é diferente em função de existência ou não de carro pré-aquecedor no FEA.

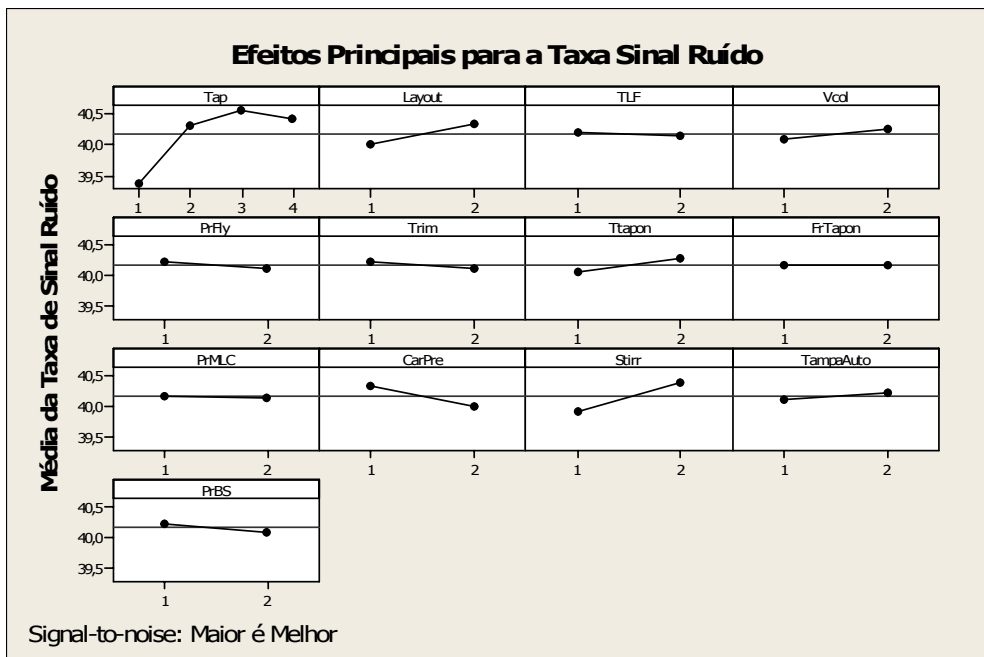


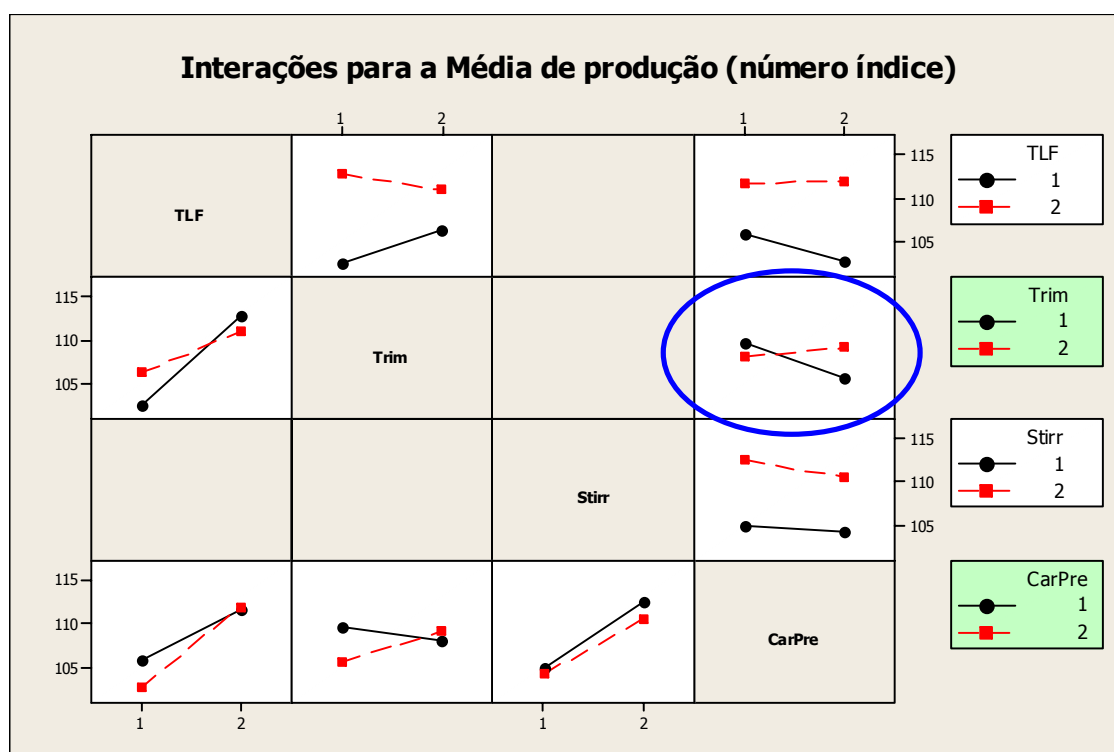
Figura 2. Efeitos dos níveis das variáveis sobre o sinal-ruído

O gráfico da Figura 2 corresponde à análise de sinal ruído, a qual indica se o conjunto de variáveis tem influência sobre a variabilidade. Como as inclinações e sentidos dos gráficos são os mesmos, conclui-se que a análise pela média é dominante.

Realizou-se a primeira análise na intenção de se determinar quais eram as variáveis mais influentes no sistema em estudo.

Em experimentos seguintes, reduziu-se a quantidade de variáveis para estudo, fixando-se as de resultados já validados. Pelo gráfico da Figura 2, vê-se que o tap to tap de nível 4 pôde ser desconsiderado.

Nesses experimentos, consideraram-se as interações que há entre as variáveis, pois, como exemplo – gráfico da Figura 3, região destacada –, sem estação de trimming, diminui a produtividade quando há pré-aquecedor no carrro do FEA. Isso porque aumenta a interferência entre as pontes rolantes. Mas, com a presença da estação de trimming e do pré-aquecedor, a produção volta a aumentar, mesmo a ponte tendo que realizar um movimento a mais pela presença da estação, se equilibra a interferência entre as pontes, gerada pelo pré-aquecedor, com diminuição de tempo de processo no FPAN com o trimming.



**Figura 3.** Interações entre as variáveis do processo

Assim, os resultados finais dos experimentos encontram-se na Tabela 4, com mostra dos mais representativos.

Nessa tabela, há destaque para níveis das variáveis, taxa de utilização das pontes rolantes, produção média anual e quantidade de esperas provocadas pela MLC e FPAN.

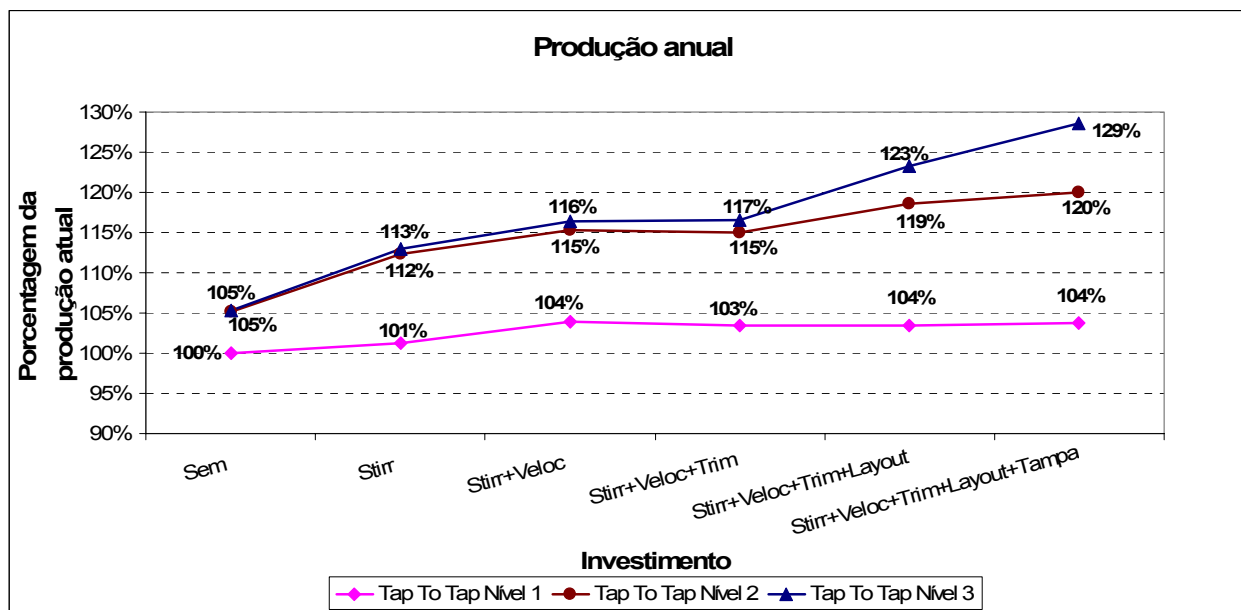
**Tabela 4. Resultados dos experimentos**

Variáveis	Níveis das Variáveis											
	Experimento1		Experimento6		Experimento7		Experimento12		Experimento13		Experimento18	
Lay Out	1		2		1		2		1		2	
Tampa automática	1		2		1		2		1		2	
Stiring	1		2		1		2		1		2	
Carro pré-aquecedor	1		1		1		1		1		1	
Velocidade de lingotamento (m/min)	1		2		1		2		1		2	
Probabilidade de Fly Tundish	1		1		1		1		1		1	
Tempo para troca de tampão (min)	1		1		1		1		1		1	
Frequência de troca de tampão	1		1		1		1		1		1	
Corte acidental da MLC	1		1		1		1		1		1	
Probabilidade de se perder veios em jato protegido	1		1		1		1		1		1	
Estação de Trimming	1		2		1		2		1		2	
Tap to Tap (min)	1		1		2		2		3		3	
Tempo de proceso no FPAN (min)	1		1		1		1		1		1	
Saídas	MCC1	MCC2	MCC1	MCC2	MCC1	MCC2	MCC1	MCC2	MCC1	MCC2	MCC1	MCC2
Produtividade (número índice)	87,23	91,99	90,84	95,02	92,20	96,24	104,49	110,55	92,25	96,57	116,51	113,91
Taxa de utilização das pontes (%)	74%	81%	52%	57%	84%	87%	60%	66%	85%	89%	68%	69%
Esperas pelas pontes (min/cor)*	1,47	1,32	0,00	0,00	5,79	4,04	0,03	0,10	8,93	7,82	0,32	0,94
Esperas por Refratários (min/cor)*	0,06	0,17	0,02	0,01	0,85	1,07	0,01	0,06	2,54	1,70	0,72	1,67
Esperas pela MLC e FPAN (min/cor)*	6,29	2,35	5,20	1,76	6,78	5,10	5,26	1,96	10,54	9,42	7,38	7,12
Produção anual (% / Atual)	100%		104%		105%		120%		105%		129%	
Quantidade de esperas MLC	59	60	81	11	108	69	72	28	225	106	191	125
Quantidade de esperas FPAN	35	50	9	11	56	284	22	62	192	428	82	434

\* esperas em minutos por corrida

As esperas provocadas pela MLC, FPAN, pontes rolantes e refratários indicam qual desses pontos restringe a capacidade de produção da aciaria, já que as esperas afetam a performance de liberação de corridas pelos FEAs.

O gráfico da Figura 4 representa todos os experimentos da tabela acima.



**Figura 4.** Investimentos e níveis de produção

## DISCUSSÃO

A melhoria do tap to tap não provoca aumento significativo na produção devido ao congestionamento à jusante – gráfico da Figura 4. O gráfico mostra também que a escolha do equipamento a investir depende do impacto na produção e do valor do investimento.



A melhoria para os níveis 2 e 3 de tap to tap somente é vantajosa se os investimentos a jusante foram realizados.

## **CONCLUSÃO**

A metodologia de simulação mostrou-se muito vantajosa para esta aplicação. Possibilitou avaliar de forma precisa e antecipada o desempenho do complexo FEA, FPAN e MLC para vários tipos de investimentos e idéias, conferindo precisão e segurança nas decisões para aumento da capacidade.

A animação realizada na simulação possibilitou o escrutínio do modelo pelas pessoas práticas da operação.

## **REFERÊNCIA**

- 1 LAW, A.M.; KELTON, W.D. **Simulation modeling and analysis**. 3. ed. Boston: McGraw-Hill, 2000.