



REVISÃO DO MODELO DE CÁLCULO DE OSCILAÇÃO POR TEMPERATURA DO ESBOÇO NA ENTRADA DO TREM ACABADOR DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE (LTQ)¹

Nilber Bhering Cordeiro²
Marlos Lopes de Oliveira³

Resumo

O nível crescente de competitividade nos mercados globais, com o foco no meio siderúrgico, impõe um imperativo constante de busca por redução de custos de produção nem sempre viabilizada por caminhos triviais de cortes em consumos de energia, insumos, matéria-prima, etc., sugerindo assim a busca no sentido de ganhar eficiência e eficácia nas metas de nível de produção, e desta forma diluindo o custo unitário do produto. Neste sentido, no LTQ da CSN, busca-se alavancar ganhos sustentáveis de produtividade atentando diariamente para as mais diferentes variáveis que constituem a complexidade do processo de laminação a quente, sempre entrelaçando a tríade: qualidade, produtividade e segurança operacional, indispensáveis a conquista da excelência operacional de baixo custo. Diante das circunstâncias acima descritas, este trabalho descreve a metodologia de ajuste do modelo matemático do cálculo térmico da Temperatura de Entrada do esboço (FET) no Trem Acabador, através da criação de novas variáveis matemáticas mais aplicáveis ao fenômeno físico, o que propiciou ganhos substanciais de acerto entre os valores calculados pelo modelo, para set up de processo, e os valores medidos. O sucesso dos ajustes, conforme objetivos iniciais, também pôde ser verificado nos ganhos reais de tempo de produção, sem afetar qualquer parâmetro que comprometesse a qualidade do produto e a segurança operacional.

Palavras-chave: Laminação; Modelo matemático; Produtividade.

REVISION OF HOT STRIP MILL (HSM) ENTRY TEMPERATURE MATHEMATICAL MODEL AIMING IMPROVEMENTS IN ROLLING PRODUCTION GAP CONTROL

Abstract

The growing steel global market competitiveness level determine the condition of constants efforts for costs reduction not always possible by trivial ways like reductions in energy consumption, raw materials, etc., and proposing more efforts in regard to improve efficiency and efficacy of production targets level, and in this way diluting the products unitary costs. In this regard, at CSN HSM have sought increase production supported gains observing day by day the different variables that compose the hot strip mill process complexity, always combining the main three points: quality, productivity and operational safety, indispensable items for reaching low cost operational excellence. Considering the circumstances above commented, this work describe the methodology for new adjustment of Finishing Mill Entry Temperature (FET) mathematical model, through of the invention of new mathematical variables more applicable to the physical phenomenon, and what provide hit essentials gains between model calculated values and actual temperature data. The adjusts success, according to initials objectives, also could be verified in terms of actual gains time production without affecting any parameter that could endanger the products quality and operational safety.

Key words: Rolling process; Mathematical Model; Productivity.

¹ Contribuição técnica ao 66º Congresso Anual da ABM, 18 a 22 de julho de 2011, São Paulo, SP, Brasil.

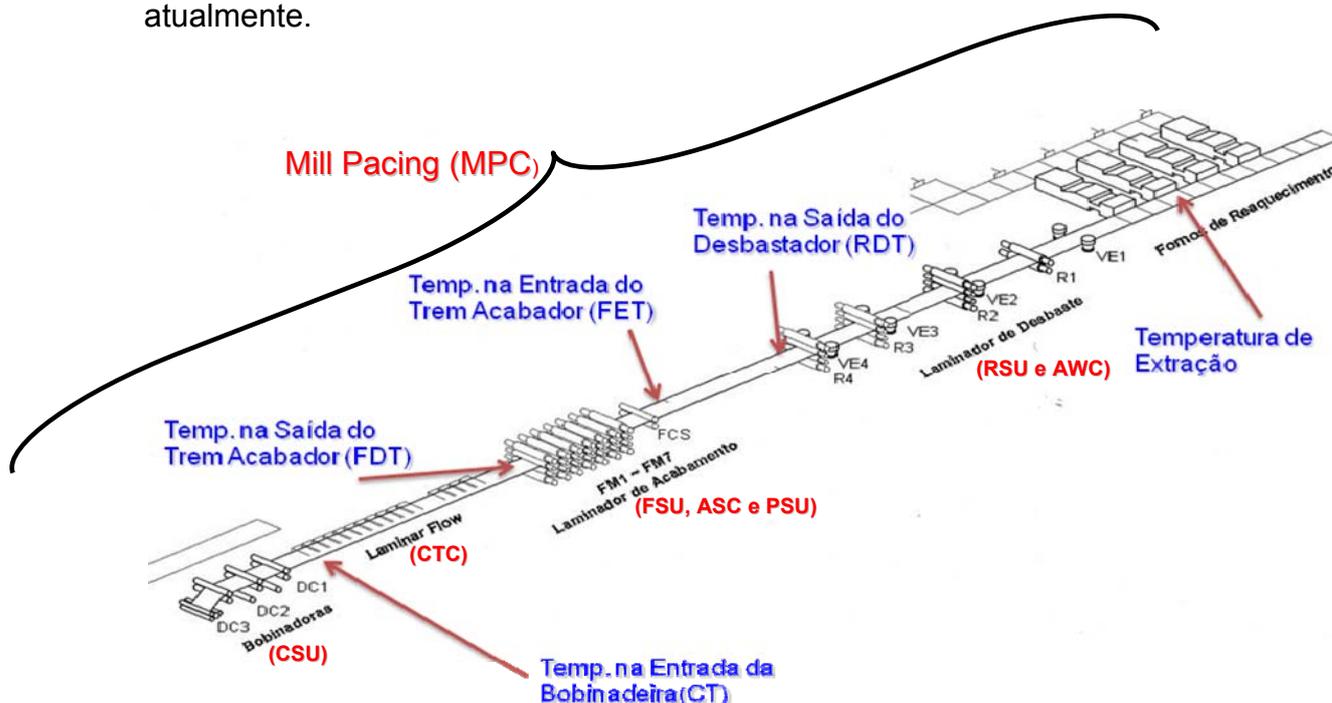
² Msc.Eng., Especialista em Laminação a Quente - GLQ;

³ Supervisor de Operação dos Fornos – GLQ;

1 INTRODUÇÃO

A CSN (Companhia Siderúrgica Nacional) possui um Laminador de Tiras a Quente (LTQ) que se destaca como o mais produtivo da América Latina e entre os maiores do mundo, com capacidade de 5,1 Mt./ano. Na planta da Usina Presidente Vargas, o LTQ tem responsabilidade capital, pois é o equipamento gargalo do fluxo produtivo da usina que garante o abastecimento de todas as linhas de laminados a frio e revestidos subsequentes.

A modelagem matemática do processo de laminação a quente tem sido um dos grandes avanços tecnológicos viabilizando de forma mais segura novos desenvolvimentos de processo, como também, conferindo sustentabilidade das práticas de processos on-line. No LTQ da CSN, após o Revamp em 2001, foram implantados modelos matemáticos monitorando e regendo o funcionamento on-line do processo desde a extração nos fornos de placas até o bobinamento, de forma que as interferências destes modelos entre eles mesmos é ponto de importante observação tão quanto os seus cálculos de funções específicas. Um bom exemplo deste nível de interferências e suas conseqüências serão apresentados neste trabalho. Na figura abaixo é apresentado o layout básico dos equipamentos do LTQ, dos pontos de medições de temperatura, e dos modelos matemáticos que operam atualmente.



Onde os modelo são:

- RSU – Set up de posicionamento do desbaste;
- AWC - Set up de parâmetros do sistema de correção de largura;
- FSU – Set up de posicionamento do trem acabador;
- ASC - Set up de parâmetros do controle dinâmico de Bending,
- PSU – Set up de posicionamento do sistema de Shift e Bending;
- CTC – Set up de posicionamento do Laminar Flow;
- CSU – Set up de posicionamento das bobinadeiras;
- MPC – Set up de ritmo de extração de placas dos fornos.

Figura 1 – Layout básico do LTQ da CSN.

Na Figura 1 é enfatizada a condição de interação entre os modelos, e neste trabalho em questão, a interação do FSU com o MPC. O MPC é um modelo que interage com todos os demais e que tem como função otimizar a extração de placas de acordo com o caminhamento das demais placas já em processamento ao longo da linha. Sendo assim seus cálculos baseiam-se em comparações contínuas dos cálculos de tempo de processamento da placa em cada etapa do processo, no momento da extração da mesma, com os tempos reais daquela placa em cada estágio de processo de laminação, seja no Desbaste, Acabamento ou Bobinadeiras. Assim o modelo estará verificando a melhor condição de abastecimento da linha, mantendo-a cada região maximizada de produção e por consequência a linha inteira. Para executar estes cálculos o MPC recebe informações tanto dos dados calculados, como reais, pelos demais modelos: RSU, FSU e CSU, basicamente variáveis de movimento como: velocidade, espaço e tempo, necessárias às previsões de caminhamento da placa ao longo da linha.

Neste trabalho o foco de nossas atenções é para oscilações que o esboço (placa após laminação no desbaste) executa a fim de atingir a FET desejada. A FET é a temperatura determinada para entrada do esboço no Acabamento e esta é definida basicamente função do grau do aço (composição química), FDT (temperatura na saída do trem acabador) especificada e qualidade superficial. Tendo em vista a grande dificuldade de garantir um perfeito balanço térmico no caminho da tira, forno até acabamento, trabalha-se com uma condição térmica mais operacionalmente segura (excesso de temperatura até o Desbaste – Temperatura de Saída do Desbaste (RDT) do meio para cima da faixa) e por isso muitas das vezes é preciso oscilar alguns poucos segundos o esboço na entrada do Trem Acabador até atingir a FET determinada. A questão é que estes poucos segundos na entrada no Acabamento trazem um efeito cascata aos processos antecessores (backward), pois no modelo do Mill Pacing há uma função de Correções Dinâmicas que recalcula a cada evento na linha a posição e tempo de cada placa de forma que, a cada extração, baseado nas posições reais das placas na linha, é feito o cálculo para a próxima extração. Assim, qualquer oscilação do esboço Δt na entrada do Acabamento afeta diretamente no cálculo da próxima extração do Forno. Este fato é bem esquematizado na Figura 2.

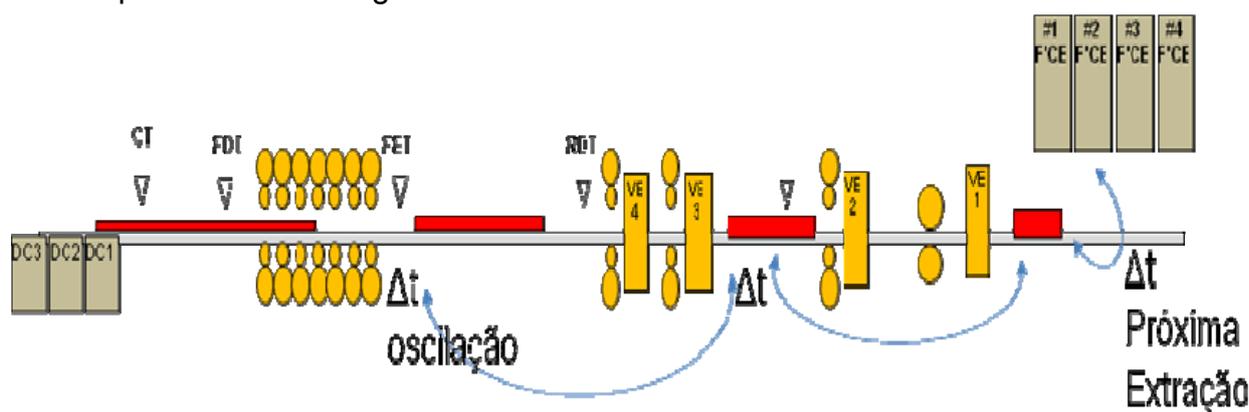


Figura 2 – Layout básico do LTQ da CSN.

Este Δt , aparentemente pequeno quando falamos de uma única placa, ganha relevância que se trata de um laminador que processa em torno de 700 placas por dia, logo em um mês, em um ano, os números tornam-se expressivos no sentido de disponibilidade de máquina.

2 MODELO DE OSCILAÇÃO

Apesar da abrangência que motivou este trabalho, a principal parte deste trabalho está focada nas mesas H, que liga o Desbaste ao Acabamento, e é nela que o esboço está exposto aos fenômenos de troca térmica que determinam o acerto da temperatura de FET. O mecanismo de oscilação é bem representado na Figura 3.

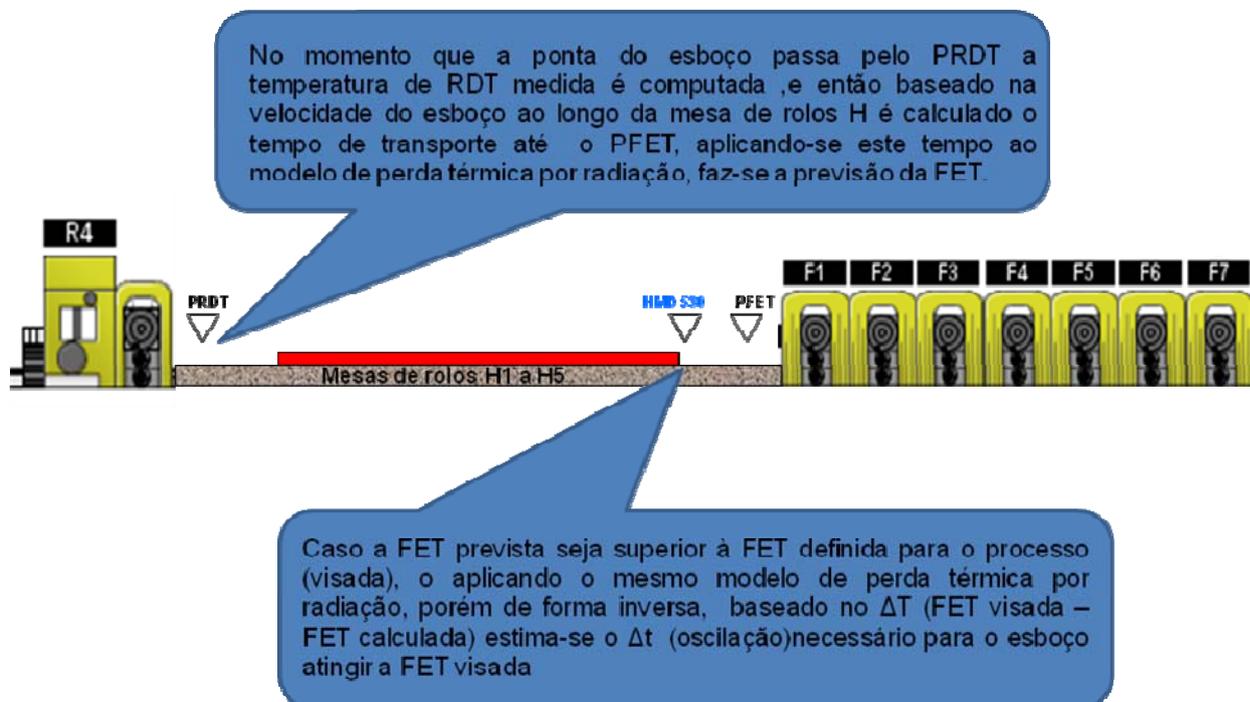


Figura 3 – Representação do mecanismo de oscilação.

Observando os dados gráficos de FET e também atentando a alguns comentários dos operadores, foi constatado que havia uma discrepância nítida entre a FET e oscilação. O comentário de alguns operadores era que não entendia o porquê de alguns materiais oscilarem e depois verificava que a FET medida (acompanhada via tela operacional) estava abaixo do visado. Nos gráficos de controle de processo, a diferença entre a FET calculada pelo sistema e a real também chamava a atenção, e como o “erro” era da FET calculada para mais, isto sinalizou que também a oscilação deveria estar sendo superestimada e, conforme demonstrado acima, na Figura 2, prejudicando a própria produtividade com atrasos no gap (pitch) de extração. No gráfico da Figura 4, é mostrado um exemplo das diferenças encontradas entre a FET visada e real numa seqüência de laminação. A diferença média nesta seqüência foi de 28°C. para uma FET calculada para mais, induzindo assim a uma oscilação desnecessária e que nesta seqüência foi em média 7,5 segundos por placa. Fazendo o levantamento nas diversas seqüências laminadas no mês de janeiro/2010, verificou-se que esta diferença de FET, um erro, foi em média de 29°C e gerou uma oscilação média de 10 segundos por placa.

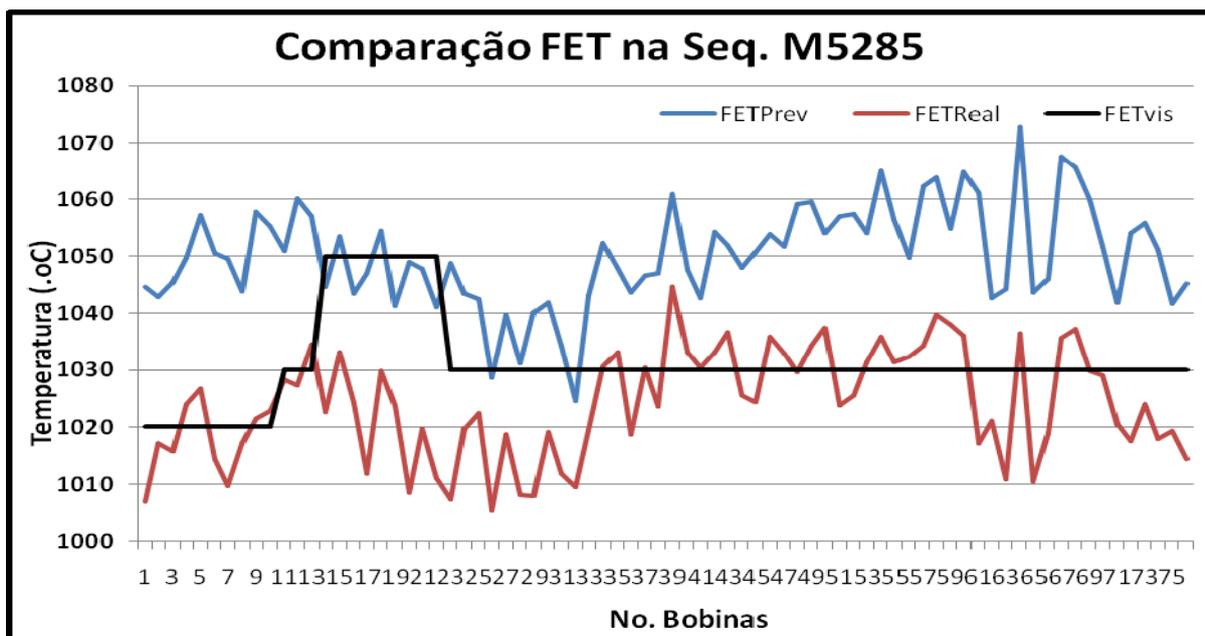


Figura 4 – Diferença entre FET calculada e real na seq. M5285.

O modelo básico de troca térmica no esboço consiste no balanço de energia térmica transmitida, refletida e emitida entre o corpo e o meio, conforme a Figura 5.

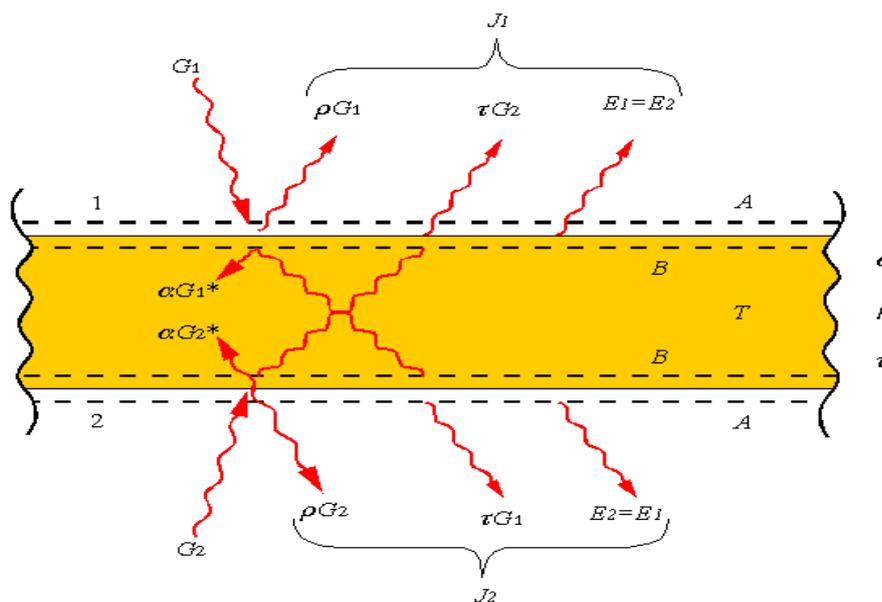


Figura 5 – Balanço de energia térmica entre esboço e ambiente.

Este balanço de energia é feito pela radiosidade (J) das superfícies de troca, podendo ser equacionada por:⁽¹⁾

$$J_1 = \rho.G_1 + \tau.G_2 + E_1$$

$$J_2 = \rho.G_2 + \tau.G_1 + E_2$$

ρ – Transmitida;

τ – Refletida;

E – Emitida.

No caso em estudo, como o esboço está aquecido a temperaturas bem mais elevadas que o ambiente, os mecanismos de transmissão e reflexão perdem o

significado ficando apenas a parcela emitida como determinante do balanço. Também algumas premissas devem ser esclarecidas neste modelamento:

- O cálculo de oscilação é baseado na temperatura de RDT da ponta do esboço;
- O tempo de deslocamento da ponta do esboço consiste no tempo estimado entre RDT On e FET ON, calculado a partir da velocidade de deslocamento do esboço, conforme a velocidade da mesa H (inicialmente velocidade da R4);
- Admitindo com pequeno o tempo de deslocamento (em segundos), despreza-se os mecanismos de troca de calor por condução e convecção, assumindo toda perda por radiação;
- Considerou-se a perda térmica uniforme pelas superfícies superior e inferior do esboço, desprezando a região de sombra da mesa H.

2.1 Cálculo da RDT e FET

Na saída do Desbastador, mesmo existindo a medição direta da temperatura do esboço após a cadeira R4, há algum efeito de resfriamento mais acentuado da superfície principalmente devido às descamações, fazendo necessário aplicar um modelo para o cálculo da RDT média do esboço, no qual pelo uso da condutividade térmica tenta-se reduzir os erros dos fatores que influenciaram na medição direta na superfície, assumindo assim uma condição de encharque mais uniforme da seção do esboço. Assim o modelamento fica da seguinte forma:⁽²⁾

$$Rdt_{med} = Rdt_{real} + \frac{q \cdot Rdh}{6 \cdot Ram} \quad \dots\dots \text{Eq. (1)}$$

Onde:

$$q = Ep \cdot Sig \cdot (Rdt_{real} + 273)^4 \quad \dots\dots \text{Eq. (2)}$$

Rdt_{med}	: RDT média do esboço	[°C];
Rdt_{real}	: RDT medida no pirômetro	[°C];
Rdh	: Espessura na Saída do Desbaste	[mm];
Ram	: Condutividade Térmica	[kcal/mhr°C];
Ep	: Taxa de Radiação	[-];
Sig	: Constante de Stefan-Boltzmann	[kcal/m ² hr°C ⁴];
Cp	: Calor Específico	[kcal/kg°C].

A ponta do esboço ao se deslocar nas mesas H, do ponto onde fica a pirômetro da RDT até o ponto da medida da FET, considerando inicialmente nenhuma oscilação, a temperatura da FET prevista da ponta do esboço é dada por:⁽²⁾

$$Fet_{prev} = Rdt_{med} + \left[\left\{ (Rdt_{med} + 273)^{-3} + \frac{6 \cdot Ep \cdot Sig \cdot Tim1}{Cp \cdot Gam \cdot Rdh} \right\}^{-\frac{1}{3}} - (Rdt_{med} + 273) \right] \quad \dots\dots \text{Eq. (3)}$$

Fet_{prev}	: FET Prevista	[°C]
Rdt_{med}	: RDT média do esboço	[°C]
Ep	: Taxa de Radiação	[-]
Sig	: Constante de Stefan-Boltzmann	[kcal/m ² hr°C ⁴]
$Tim1$: Tempo entre “RDT On” to “F1 On”	[hr]
Cp	: Calor Específico	[kcal/kg°C]
Gam	: Gravidade Específica	[kg/m ³]
Rdh	: Espessura na Saída do Desbaste	[mm]

Após a primeira previsão de FET (FET_{prev}), conforme a Eq. (3), é verificado então se a FET calculada é igual ou menor (dentro do mínimo) que a FET objetivada (FET_{vis}) pelo processo, atendida esta condição, o set up de carga do laminador é feito e então dada condições para continuidade do processo. Caso contrário, se a $FET_{prev} > FET_{vis}$ então é preciso determinar o tempo de oscilação necessário para atingir a FET_{vis} . O primeiro passo para é calcular a taxa de troca/perda térmica (TPT em °C/h) para aquela temperatura:⁽²⁾

$$TPT = -\frac{2 \cdot Ep \cdot Sig}{Cp \cdot Gam \cdot Rdh} (Fet_{prev} + 273)^4 \quad \dots\dots\dots \text{Eq. (4)}$$

Conhecida a TPT é possível aplicá-la à diferença de FET e determinar o tempo necessário de oscilação (Δt) para atingir a FET objetivada:

$$\Delta t = \frac{(Fet_{vis} - Fet_{prev})}{TPT} \quad \dots\dots\dots \text{Eq. (5)}$$

2.2 Metodologia de Ajuste da FET e da Oscilação

Em um primeiro momento, desconsiderando a questão da oscilação, os erros no cálculo da temperatura de FET não estavam trazendo conseqüências significativas no processo, mesmo nos cálculos de carga do laminador onde ela é uma variável aplicada na previsão de resistência à deformação do material, estas diferenças eram absorvidas, provavelmente, pelos coeficientes de aprendizado de força de laminação. Assim, sob esta ótica, o trabalho não precisaria ser no sentido de corrigir o erro cálculo da FET, mas somente eliminar seu efeito ajustando a oscilação através de um coeficiente específico, conforme a seguir.

$$\Delta t = \text{COEF} \cdot \frac{(Fet_{vis} - Fet_{prev})}{TPT} \quad \dots\dots \text{Eq. (6)}$$

No entanto, analisando melhor a forma de tratar o problema, a solução acima, apesar de mais simplista, estaria abordando o efeito e não a causa fundamental do

excesso de oscilação que era o erro na previsão da FET. Assim, avaliando a Eq. (3), foi concluído que havia na Taxa de Radiação uma possibilidade de trabalhar em ajustes, pois ela foi tratada originalmente como uma constante e nos dados reais de processo os erros variavam com função dos materiais, como também com as temperaturas base de RDT conforme Figura 6. Desta forma foi implantada uma alteração nos arquivos do programa do modelo de forma a permitir o ajuste da Taxa de Radiação em função de cada faixa de RDT, combinado com as características básicas dos materiais com grau de aço, espessura e largura, ficando a Eq.(3) da seguinte forma ⁽²⁾:

$$Fet_{Pr ev} = Rdt_{med} + \left[\left\{ (Rdt_{med} + 273)^{-3} + \frac{6 \cdot E_p f(RDT, G, E, L) \cdot Sig \cdot Tim1}{C_p \cdot Gam \cdot Rdh} \right\}^{\frac{1}{3}} - (Rdt_{med} + 273) \right] \dots \text{Eq. (7)}$$

Onde :

$$E_p = f(RDT, \text{Grau}, \text{Espessura}, \text{Largura}).$$

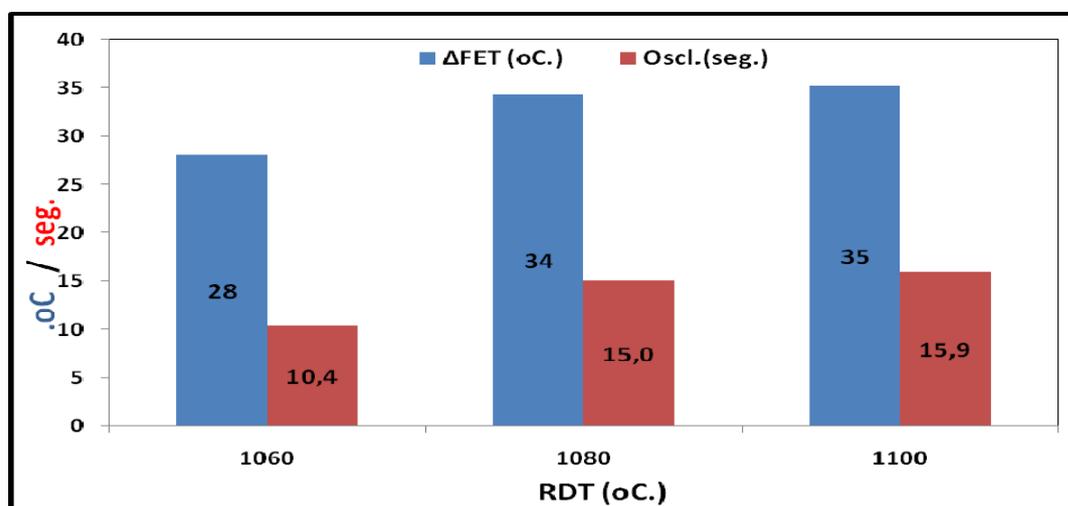


Figura 6 – Variação dos erros de FET e ocorrência de oscilação por faixa de RDT.

Uma preocupação inicial era como seria o comportamento dos cálculos com o novo ajuste, desta forma num primeiro momento resolveu-se verificar os materiais onde qualquer falha nestes ajustes, que tenderiam reduzir a FET calculada e oscilação, e por sua vez a FET real poderia subir, não seria muito sensível à questão da qualidade superficial. De forma favorável, avaliando o grupo materiais de RDT mais elevadas verificou-se que era exatamente neles que havia um maior % de bobinas com oscilação, gerando uma situação em que era possível ao iniciar os ajustes por eles atingir uma gama boa de materiais (Figura 7) e ao mesmo tempo ficar mais resguardados dos riscos relativos à qualidade superficial uma vez que, para a RDT elevada, os materiais que laminados nesta temperatura estão menos críticos aos problemas de superfície.

À medida que se observou alguma efetividade dos parâmetros de ajuste nos resultados na FET calculada, mesmo na fase inicial e por isso em poucos materiais, para materiais mais críticos observou-se que poderiam existir alguns riscos de erros indesejáveis no modelo de carga do set up do Trem Acabador. Diante deste contexto foi considerado seguro, para alguns materiais, buscar uma forma alternativa de avaliar os ajustes. O modelo atual possui um ambiente de simulação off-line para testar vários ajustes, porém, neste trabalho, os testes no ambiente de

simulação off-line não atenderiam uma vez que, para avaliar melhor os resultados, precisava-se de dados reais para comparar os cálculos.

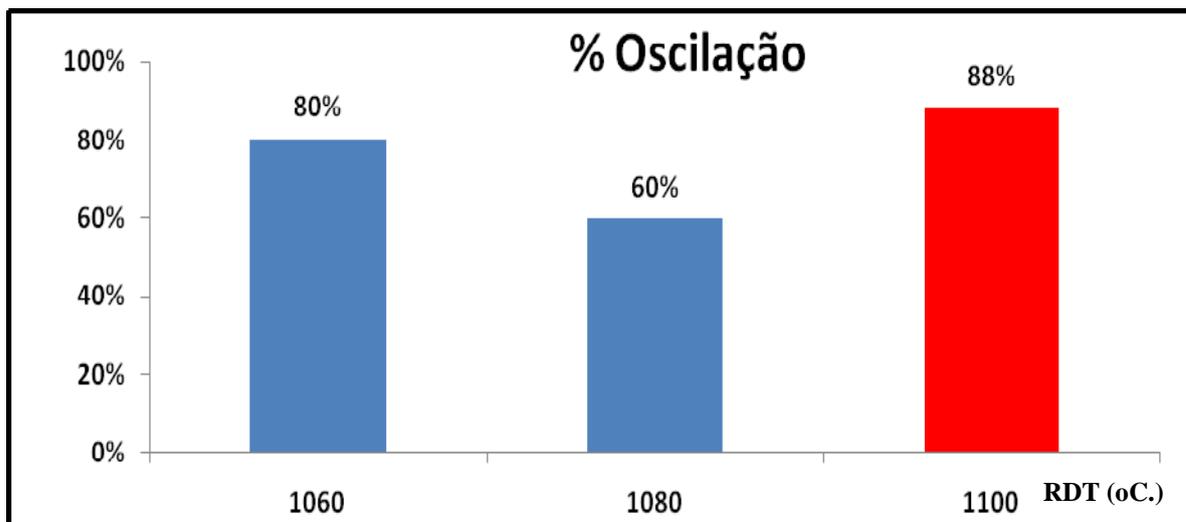


Figura 7 - % de bobinas com oscilação por faixa de RDT.

Assim encontramos um caminho inovador para a solução deste problema que consistiu numa modificação do programa on-line que passou a gerar dois caminhos de dados, um usado no set up e sem os ajustes, e outro com os ajustes que simplesmente abastecia o banco de dados para análise dos resultados. Isto facilitou a implantação mais segura dos ajustes, respeitando a estabilidade operacional e ao mesmo tempo acelerando o processo de ajustes com dados mais concretos e já trabalhados.

3 RESULTADOS OPERACIONAIS

Durante os meses de janeiro e fevereiro os ajustes praticamente foram feitos, conforme discutido anteriormente, em alguns poucos materiais e também apenas para geração de um banco dados de avaliação dos resultados. Somente em março foi iniciada gradativamente a implantação on-line das novas Taxas de Radiação. Os resultados da implantação progressiva das novas taxas podem ser observados na Figura 8. Neste gráfico se pode visualizar claramente os resultados do processo de ajuste, observando uma redução em torno de 15°C no erro de cálculo de FET prevista e com uma conseqüente redução de 10 seg. na média de oscilação (exemplo material com RDT 1.080°C.). O processo de ajuste ainda está em andamento, porém considerando algumas questões de interferência de medição da FET na superfície, não se acredita que é possível evoluir muito mais na questão da correção do erro da FET sem aumentar os riscos de ter um material muito frio em casos isolados de problema de encharcamento de temperatura. Um ponto importante de comentar é que reduzindo as oscilações, uma preocupação era o aumento da FET real que por sua vez não aconteceu significativamente, conforme figura 9, e não gerando riscos às questões de qualidade superficial BQ, ou seja, ocorrência de carepa. Também com a maior garantia da FET dentro do objetivado abriu-se margens para conseguir trabalhar com temperaturas de extração visadas mais baixas, conforme foi feito nos meses de abril e maio, que foram reduzidas nas seqüências do tipo E, W, M e Y, de 1.150°C para 1.140°C, e que acabou contribuindo para uma FET real ainda menor.

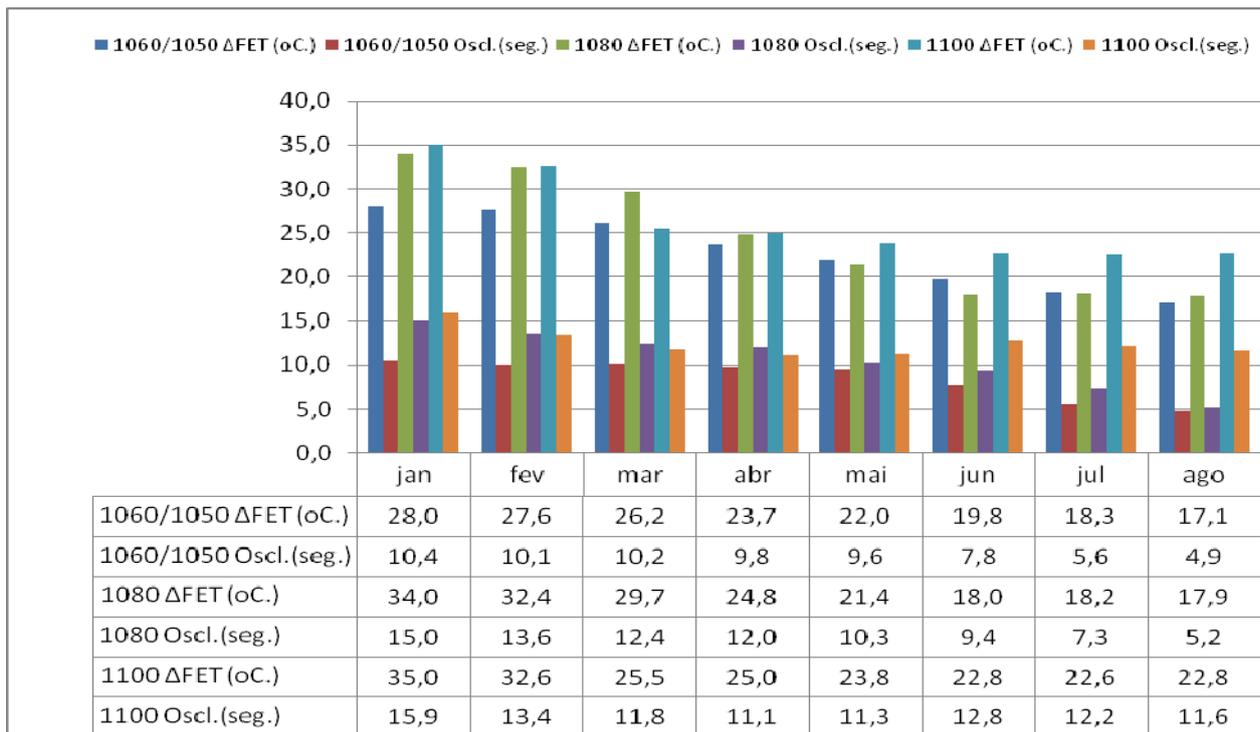


Figura 8 – Redução progressiva dos erros de FET e oscilação.

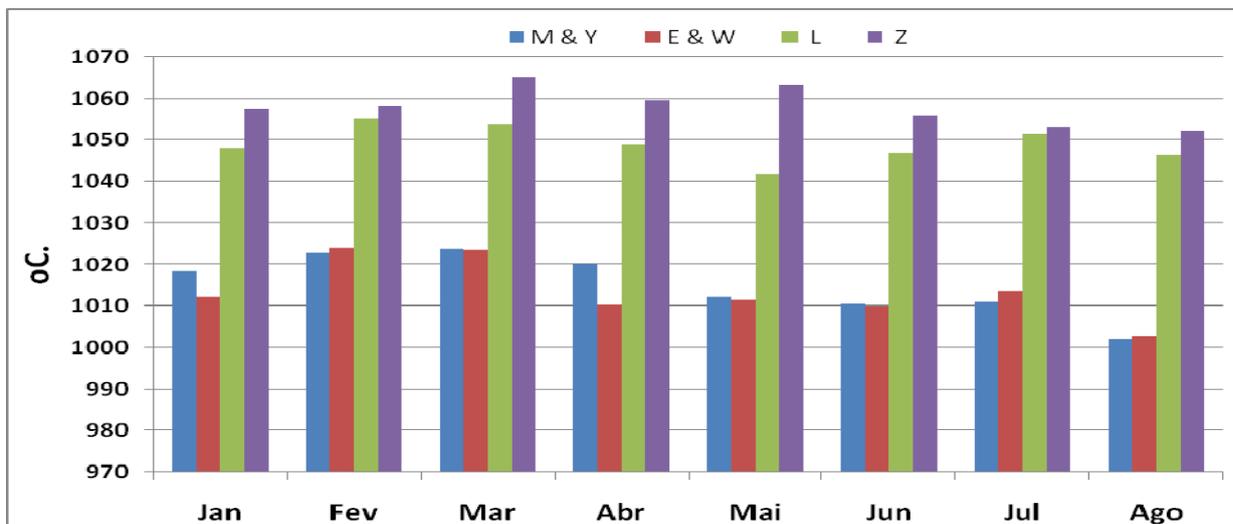


Figura 9 – Comportamento da FET média real nos meses de 2010.

3.1 Resultados de Produção

A forma de traduzir os ganhos na oscilação para produção é avaliar seu impacto no ritmo de extração de placas nos forno o qual é ditado pelo modelo do MPC. Para uma avaliação mais precisa foi necessário separar uma gama de material com características de produtividade associados às dimensões, tipo de seqüência de laminação, números de fornos, descarte de paradas, enfim parâmetros operacionais que permitissem classificar como um mesmo padrão de ritmo de processamento. Segue abaixo, na Figura 10, a avaliação dos ganhos em tempo de extração com a correção das oscilações por FET, assim como as premissas básicas adotadas. Para

referência foi tomado como ponto inicial de avaliação a segunda quinzena do mês de março, pois nele ainda os ajustes estavam parcialmente on-line, também foi um período que trabalhou com quatro fornos.

Premissas:

- Seq. M, Y, E e W;
- 4 Fornos;
- Espessura 2,00 a 5,00 mm;
- Largura 715 a 1250 mm;
- MPC no Modo Pacing c/ ritmo operador de F1 gap de 15 seg.;
- Tempo máximo de vazio da F1 de 100 seg.

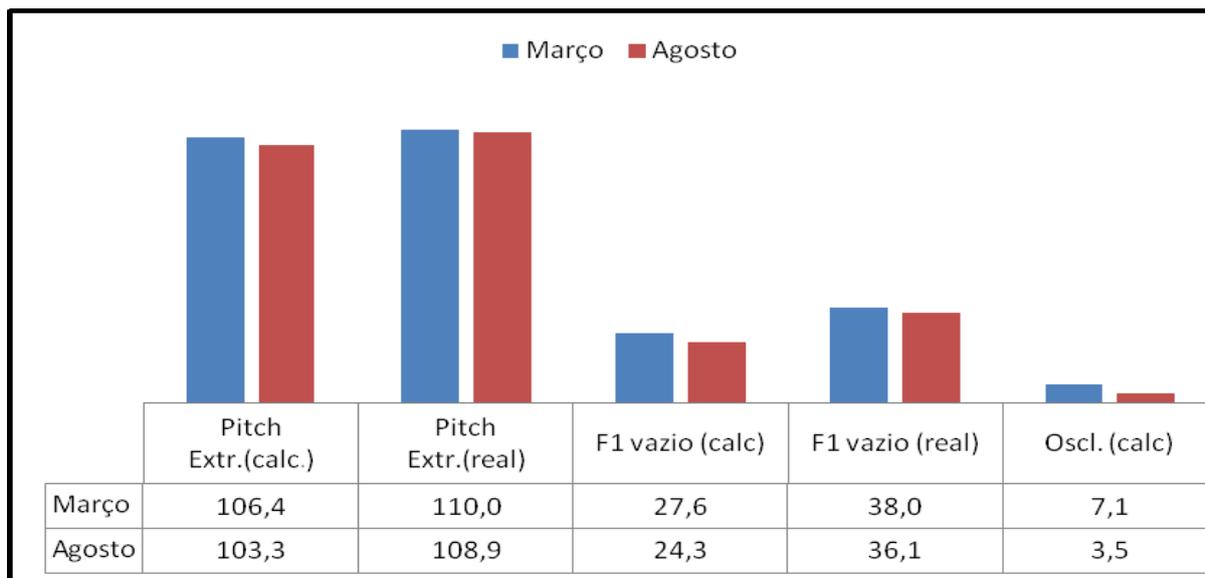


Figura 10 – Ganhos de tempo em oscilação e Pitch de extração.

No gráfico acima o Pitch de Extração representa o intervalo de extração entre placas de cada forno, assim é possível observar que com os ajustes a redução de mais de 3 segundos na oscilação na entrada do Trem Acabador foi traduzida em aproximadamente 3 segundos em antecipação (Pitch menor) da extração de cada placa.

3.2 Resultados de Financeiros

Como a avaliação dos ganhos em tempo de extração foi feita considerando a laminação em modo Pacing, cujo princípio traduz no controle de vazio da cadeira F1 do Acabamento (entrada do Trem Acabador), foi considerado mais coerente atribuir os ganhos reais de redução de tempo de extração apenas nos materiais cujo gargalo fosse o Acabamento, apesar de se constatar também alguns ganhos, não consistentes, em materiais com gargalo Forno. Levantando dados dos meses deste ano, observou-se que foi que na média 30% da produção que teve como gargalo o Acabamento, desta forma os ganhos potenciais de produção deste trabalho podem ser convertidos em ganhos de financeiros da seguinte forma:

Tempo extra de produção com a redução do Pitch de Extração:

- % de material cujo gargalo de processo é o Acabamento = 30%;
- Número de placas laminadas por mês (base 5.100 Mton./ano) = 19.000 placas;

Logo o ganho anual em horas de disponibilidade de produção será:



$30\% \times 19000 \text{ placas/mês} \times 3 \text{ seg./placa} = 4,75 \text{ horas/mês} = 57 \text{ h/ano.}$
Aplicado ao tempo à produtividade e a utilização, temos a produção de:
 $57 \text{ h/ano} \times 720 \text{ ton./hora} \times 0,90(\text{utilização}) = 37.000 \text{ ton./ano}$

4 COMENTÁRIOS E CONCLUSÕES

- Apesar de não devidamente discutido e avaliado neste trabalho, os erros de previsão oscilação e conseqüentemente de tempo de extração, para mais, poderiam afetar o Pacing do modelo do Forno que, por sua vez, enganariam o modelo de aquecimento e de combustão ocasionando prejuízos na qualidade de aquecimento da placa (encharque), ou mesmo retardando a disponibilidade do forno para extração;
- Alguns ganhos reais e imediatos no ritmo de laminação (modelo Mill Pacing) ficaram pendentes e que devem ser melhores estudados para convergir aos ganhos potenciais gerados com o ajuste feito neste trabalho;
- Mais uma vez observa-se a complexidade e abrangência dos processos associados à laminação a quente, reforçando a idéia da atenção aos pequenos detalhes, neste caso o erro na previsão de FET que acabou sendo absorvido pelo modelo de carga do Acabamento sem qualquer efeito direto no processo, porém era fonte de erro lá na extração do Forno e assim afetando cinética do processo como um todo, afinal a laminação a quente começa no Forno e termina na Bobinadeira.

REFERÊNCIAS

- 1 Serway, Raymond; W. Jewett, John. Tradução Koch Torres, André; Freire de Melo, Leonardo. **Princípios de Física**. In: ___*Física quântica*. Cap28. Pág 1094-1135. (2004) 3^o Edição. São Paulo. Editora Thomson;
- 2 Manual do Modelo Matemático da Mitsubishi Electric Corporation, Kobe, 2000.