

AJUSTES NO MODELO DE RITMO DO LAMINADOR DE TIRAS A QUENTE COM FOCO NA PRODUTIVIDADE *

Leonardo Zuchi Guio¹
Juliano Braz Possatt²
Luciano Milanez Mazzi³
Wellington Luiz Soares⁴

Resumo

A ArcelorMittal Tubarão vem trabalhando continuamente no aumento de produção de seu Laminador de Tiras a Quente (LTQ). Com o aumento da produção, o risco de colisão de material ao longo do LTQ, com maior possibilidade de ocorrência na mesa de resfriamento de tiras, se elevou. De forma a permitir aumento de produção e evitar colisão de material, desde o início de 2016 iniciou-se um trabalho de ajuste no modelo. Dado que o modelo consiste na determinação do ritmo de laminação a partir da liberação de extração de placas dos fornos, início do processo de laminação, o trabalho envolveu a criação de um ponto de controle de ritmo no meio da linha do laminador. Para suportar um controle adequado nesse ponto, foram necessários ajustes de parâmetros e cálculos para aumento da precisão do modelo. Esse trabalho apresenta os ajustes realizados para utilização do novo ponto de controle, bem como os ajustes realizados para aumento da precisão do modelo e os ganhos de produtividade obtidos a partir desses ajustes.

Palavras-chave: Modelo de Ritmo; Produtividade; Laminador de Tiras a Quente.

TÍTULO DO TRABALHO EM INGLÊS

Abstract

ArcelorMittal Tubarão has been working continuously on increasing the production of its Hot Strip Mill (HSM). With increased production, the risk of material collision along the HSM, with higher probability in strip cooling table, has increased. In order to allow production increase and to avoid material collision, since the beginning of 2016 a model adjustment work has started. Given that the model consists in setting the rolling pacing by allowing slab extraction from furnaces, beginning of rolling process, the work evolved the creation of a pacing control point in the middle of the mill line. To support an appropriate control in this point, parameters and calculus adjustments were needed to increase the model accuracy. This paper presents the adjustments made to use the new control point, as well as the adjustments made to increase the model accuracy and the productivity gains obtained from these adjustments..

Keywords: Mill Pacing; Productivity; Hot Strip Mill.

¹ Especialista de Desenvolvimento de Sistemas de Automação – ArcelorMittal Tubarão.

² Especialista em Laminação de Tiras a Quente – ArcelorMittal Tubarão.

³ Engenheiro de Automação – ArcelorMittal Tubarão.

⁴ Engenheiro Especialista de Manutenção de Controle de Processo – ArcelorMittal Tubarão.

1 INTRODUÇÃO

O modelo de ritmo do Laminador de Tiras a Quente (LTQ) é uma função do sistema de Nível 2 denominado Mill Pacing, cujo objetivo é calcular os tempos de transporte/laminação de cada bobina para obtenção do intervalo de descarregamento de placas do forno de reaquecimento de placas de forma a evitar que durante a laminação haja colisão com o esboço/tira anterior.

O único ponto de controle automático de ritmo desse modelo é o forno, pois ele determina o momento em que uma placa deve ser desenfundada. A partir desse momento, a placa percorre a linha segundo o perfil de velocidade, conforme Figura 1, podendo haver alterações de velocidades devido a alterações do operador ou por leituras de dados que influenciam os *setups* de velocidade do material.

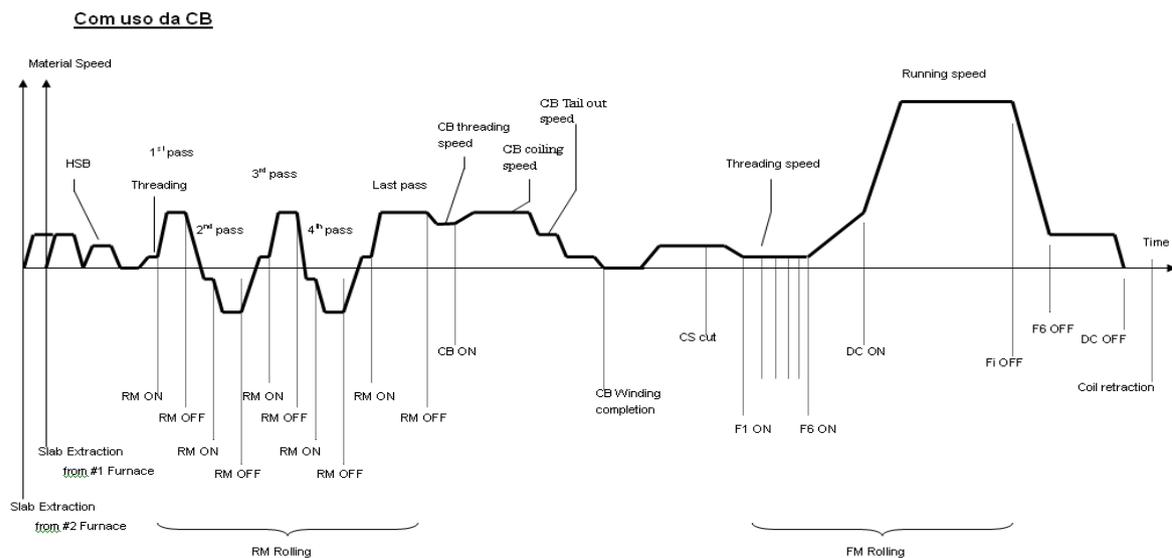


Figura 1. Perfil de velocidade com uso de Coil-Box.

Por ser uma previsão no início do processo de laminação, utilizando em seus cálculos dados com possibilidade de alteração ao longo do processo, o modelo Mill Pacing possui parâmetros que são configurados de modo que a produtividade seja a maior possível sem que as proteções anti-colisão existentes no Nível 1 sejam acionadas.

Para a determinação do ritmo, o Mill Pacing calcula o momento em que cada tira inicia a utilização de um equipamento da linha, denominado *On*, e o momento em que cada tira libera o equipamento para a próxima tira, denominado *Off*.

Entre duas tiras em sequência, o momento em que a tira anterior libera o equipamento e o momento em que a tira seguinte inicia a utilização do equipamento é denominado *Onf*. O intervalo de descarregamento da placa atual é o maior *Onf* da placa atual com a anterior dentre os calculados para os equipamentos da linha, acrescido do tempo do processo de descarregamento da placa atual.

A Figura 2 apresenta pontos relevantes para o Mill Pacing, incluindo os equipamentos da linha cujos tempos são calculados: *Rougher Mill* (RM), *Coil-Box* (CB), *Finishing-Mill* (FM) e *Down-Coiler* (DC).

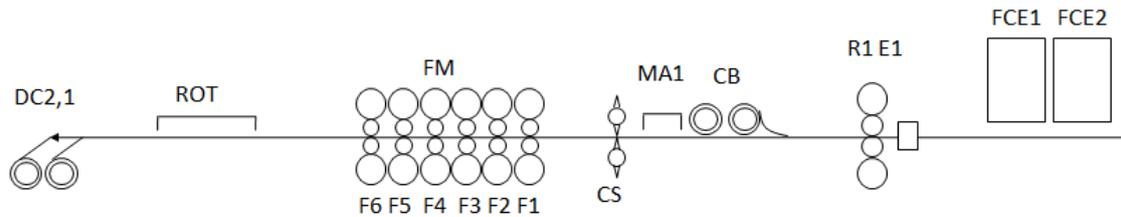


Figura 2. Pontos de interesse do Mill Pacing.

Com o aumento de produção no LTQ visando atingir uma produção anual de 4.5Mt/ano, foi necessário melhorar a precisão do Mill Pacing, além de acrescentar funcionalidades ao mesmo. Essas modificações são descritas no Item 2 deste trabalho.

2 MODIFICAÇÕES NO MODELO

Com a redução do intervalo entre tiras, aumentou-se o risco de ocorrer colisão entre duas tiras na mesa de resfriamento de tiras (*Run-Out Table* – ROT). Para evitar colisão na ROT, foi criado um ponto de controle adicional na região de entrada da tesoura de pontas (*Crop-Shear* – CS), denominada zona MA1, e desenvolvida uma proteção que consiste em comparar os tempos de atravessamento da tira atual e da anterior a partir da *Coil-Box* e, caso seja identificado risco de colisão, a bobina atual aguarda um tempo determinado na região MA1. O controle do *tracking* das tiras e do tempo de espera foi implementado no Nível 1. Assim que a tira anterior sai da tesoura, um contador é disparado e a tira atual aguarda na zona MA1 até que o tempo necessário para evitar colisão seja atingido, conforme detalhado na Figura 3.

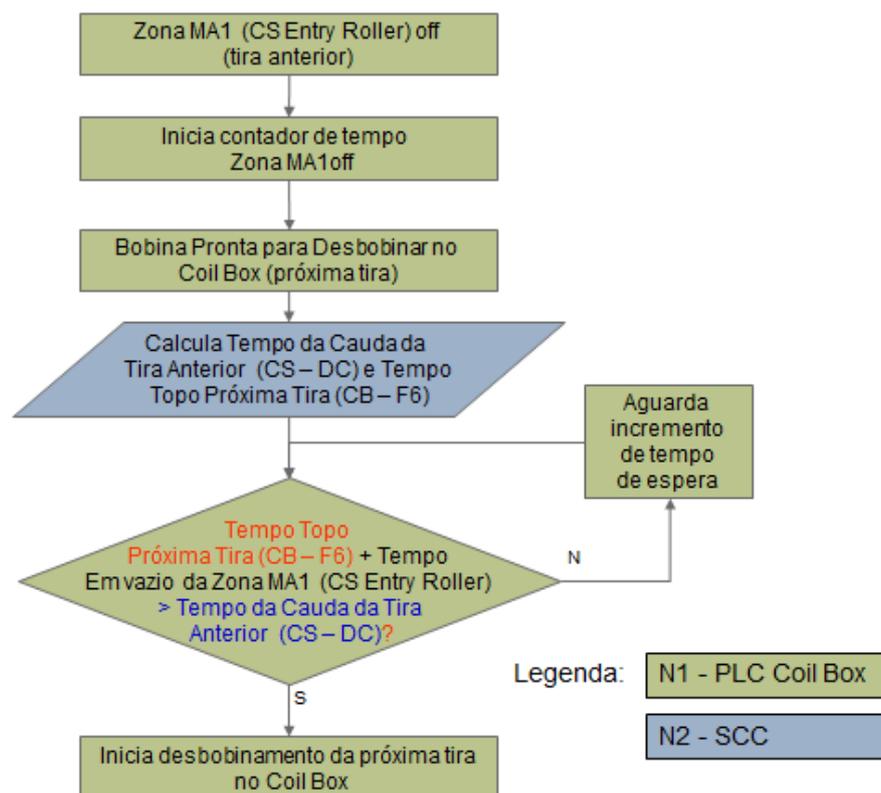


Figura 3. Fluxograma do controle para evitar colisão de tiras.

No Mill Pacing foram desenvolvidos os cálculos dos tempos de atravessamento e do tempo de espera na zona MA1. Esses cálculos são realizados assim que o Mill Pacing calcula os tempos previstos da próxima placa a ser descarregada do forno. A Figura 4 mostra os intervalos relevantes para o cálculo do tempo de espera.

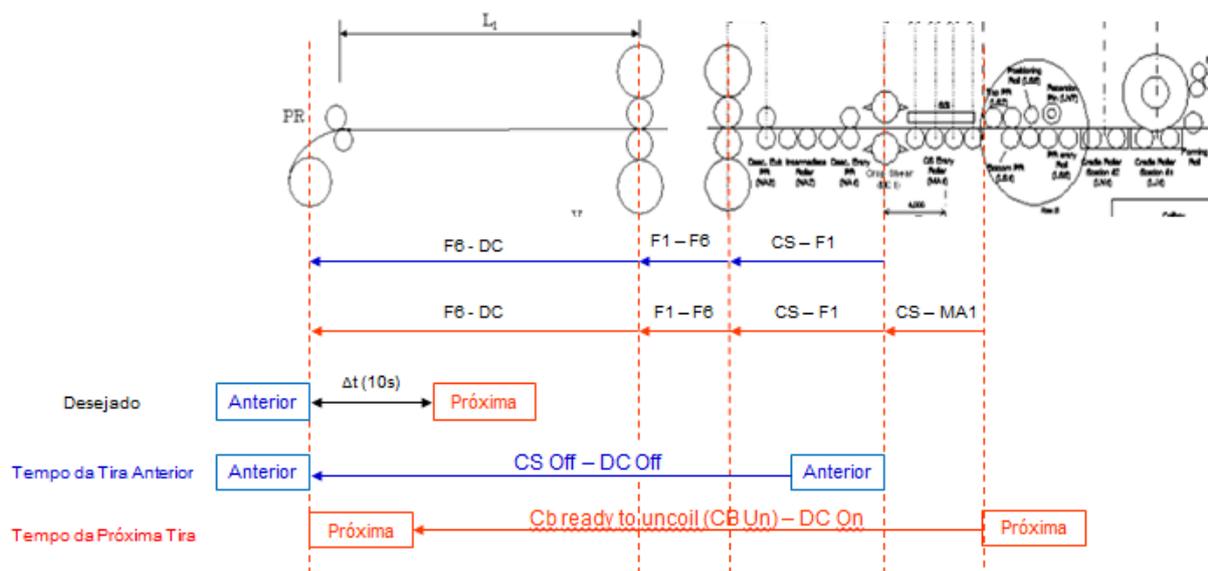


Figura 4. Intervalos utilizados no cálculo do tempo de espera.

Os valores iniciais calculados para o tempo de espera, quando comparados com os valores reais obtidos pelos sensores do laminador mostraram-se muito conservadores. O tempo de espera real estava 92,17% até 10s, sendo que apenas 71,15% do tempo de espera calculado estava até 10s. Apenas 68,36% do erro do tempo de espera estava entre $\pm 3s$ e 91,1% entre $\pm 6s$.

A aplicação de tais tempos de espera implicaria em atrasos desnecessários (erro positivo) ou risco de colisão (erro negativo). Sendo assim, os tempos previstos pelo Mill Pacing precisavam ser ajustados.

2.1 Melhoria na Precisão do Mill Pacing

Dado que o modelo calcula basicamente o intervalo entre os pontos de controle e depois toma como referência o momento do desenformamento, aumentar a precisão do modelo implica em aumentar a precisão do cálculo de cada intervalo na região de interesse, ou seja, a partir da *Coil-Box*.

A metodologia utilizada consistiu na análise do erro do modelo atual (média, desvio padrão e amplitude do erro), realização de ajustes *off-line* nos cálculos dos intervalos (sem aplicação direta no processo), comparação dos resultados obtidos com os atuais e aplicação dos ajustes que apresentavam valores mais precisos.

Dentre os ajustes realizados, alguns buscaram adequar o modelo à documentação, outros foram no sentido de inserir no modelo a condição real existente, através de ajuste de parâmetros e curvas, e outros ajustes foram realizados estatisticamente.

2.1.1 Ajuste do Perfil de Velocidade para Placas Curtas

Na primeira análise dos cálculos do modelo, foi identificada uma condição que afetava o cálculo do tempo DC On para placas curtas. Quando a placa é curta, a tira gerada é menor que o comprimento da ROT e assim o perfil de velocidade muda (Figura 5), pois a velocidade de *running* (V_{RUN}) não é atingida. Com V_{RUN} incorretamente maior, o comprimento de desaceleração fica maior e assim DC On fica incorretamente menor.

Essa condição era detectada e o perfil de velocidade era corrigido, mas o ponto DC On não era recalculado para uso no Mill Pacing. Assim, foi necessário recalculer DC On no Mill Pacing. O recálculo consistiu em realizar a soma dos comprimentos de cada segmento do perfil de velocidade já corrigido a partir da F6 On até atingir o comprimento da ROT, ponto então considerado como o ponto em que o topo da tira atinge a DC (DC On).

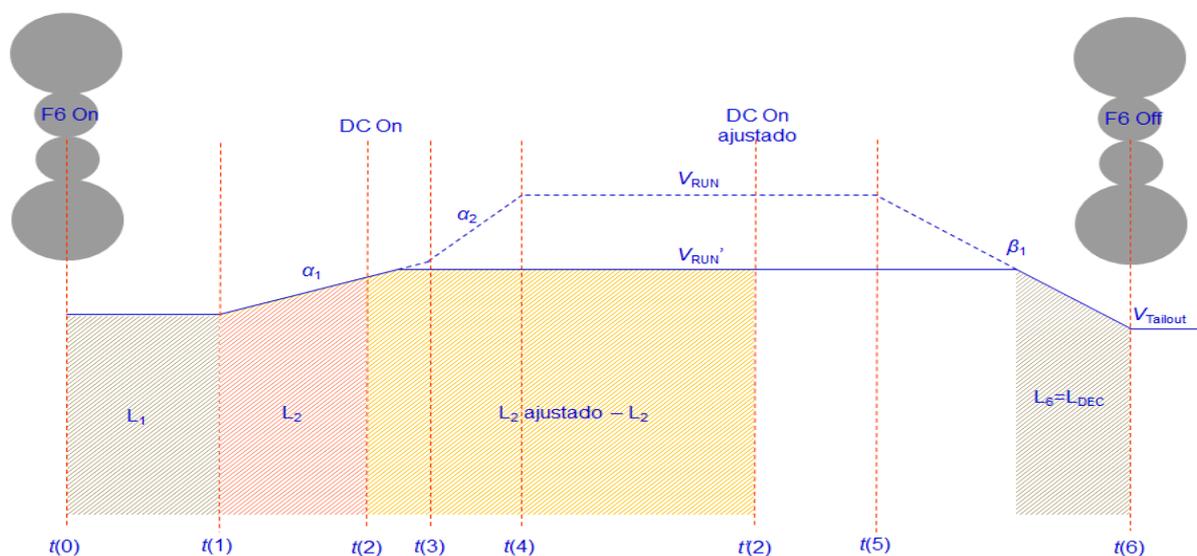


Figura 5. Perfil de velocidade para placas curtas.

Com o ajuste, o intervalo DC On - F6 On aumentou em média 0,55s (o erro médio diminuiu de -0,69s para -0,14s) e o desvio padrão do erro reduziu de 1,33s para 0,83s. A faixa de valores de erro reduziu de [-14, 3] para [-4, 2]. Ao analisar apenas bobinas com comprimento menor que a ROT, o intervalo diminuiu em média 3s.

2.1.2 Alteração do Cálculo dos Intervalos na Região da Coil-Box

Partindo para o ajuste efetivo dos intervalos calculados pelo Mill Pacing, foi feita a análise de cada intervalo, iniciando-se na *Coil-Box* e seguindo no sentido das bobinadeiras.

Na região da *Coil-Box*, a documentação indicava um perfil de velocidade, mas o modelo não representava um perfil para cálculo dos intervalos, se limitando a parâmetros fixos de tempo. Adicionalmente, não havia no modelo o ponto de controle que indicasse que a bobina havia chegado até a zona MA1, ponto necessário para o cálculo que evita colisão.

A Figura 6 mostra os parâmetros de tempo e cálculos que eram realizados pelo modelo para obter os intervalos entre os pontos de controle quando há uso de *Coil-Box*.

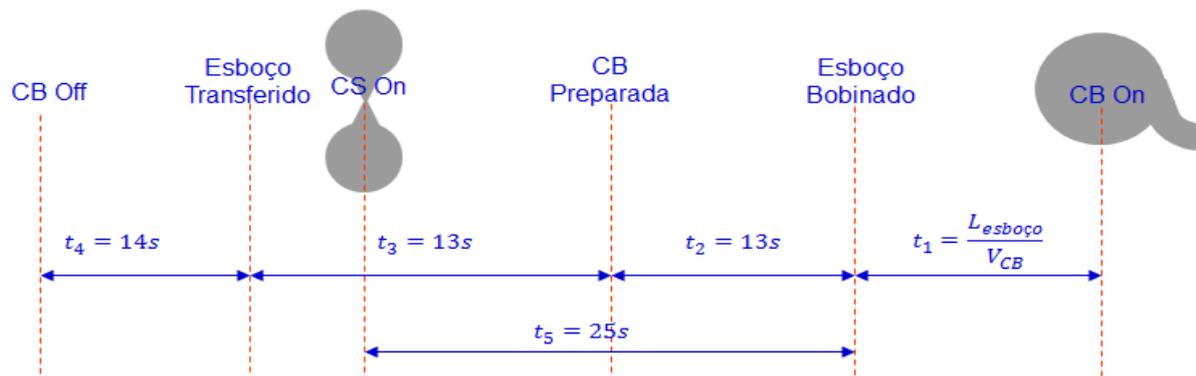


Figura 6. Intervalos na região da Coil-Box antes dos ajustes.

Utilizando-se da documentação e após análise foram levantados os valores exatos de velocidade, aceleração e de constantes de tempo das manobras do equipamento e o modelo foi ajustado conforme a figura abaixo. É possível notar que o ponto de controle MA1 On foi criado, bem como o ponto CB Unc, representando o momento em que a bobina está pronta para desbobinar. O ponto de controle CB Off, apesar de não apresentado na Figura 7, tem seu cálculo simplificado com a criação do ponto CB Unc, pois passa a ser o tempo de desenrolamento do esboço (comprimento do esboço dividido pela velocidade na *Crop-Shear*, V_{CS}).

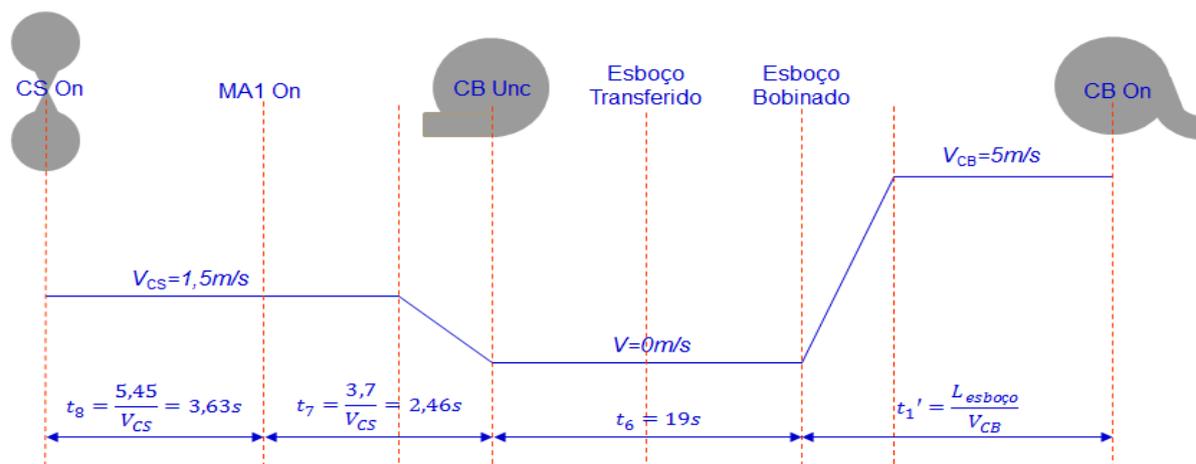


Figura 7. Intervalos na região da Coil-Box após os ajustes.

Para o caso de bobinas que não utilizam *Coil-Box*, a velocidade em toda a região da *Coil-Box* é V_{CS} , foi necessário criar os pontos de controle CB Unc e MA1 On e calcular seus tempos a partir de suas distâncias da *Coil-Box*. Já o cálculo de CB Off passou a ser com referência a F1 Off, subtraindo desse a distância de CB a F1 dividida pela velocidade *tail-out* ($V_{TAILOUT}$).

O ajuste dos cálculos da região da *Coil-Box* não trouxe ganhos de precisão significativos, entretanto, corrigiu inconsistências no modelo e foi necessário para calcular os pontos de controle envolvidos no cálculo do tempo de segurança que evita colisão de tiras.

Em análise do intervalo CS On e F1 On, identificou-se que o cálculo considerava velocidade constante igual a *threading speed* ($V_{Threading}$), entretanto, o topo do material sai de CS On com velocidade fixa para corte na tesoura V_{CS} e somente em

F1 atinge a *threading speed* (Figura 8). Tal mudança de velocidade passou a ser considerada no modelo.

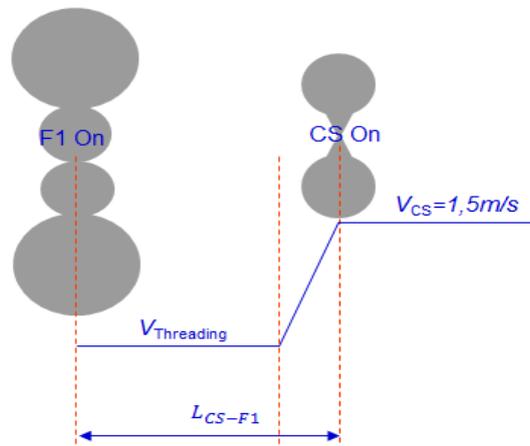


Figura 8. Perfil de velocidade entre a Crop-Shear e a cadeira de laminação F1.

Com o ajuste, o intervalo F1 On - CS On reduziu em média 6,34s (o erro médio diminuiu de 7,28s para 0,94s), o desvio padrão do erro reduziu de 2,53s para 0,58s. A faixa de valores de erro reduziu de [-5, 13] para [-8, 2].

Alguns intervalos analisados não apresentavam diferença entre a documentação e o modelo, e estavam coerentes com os controles de velocidade implementados no Nível 1, porém, a previsão do modelo não era confirmada pelos valores reais. Esses casos apresentavam erros de previsão dos intervalos pequenos, entretanto, quando somados comprometiam a previsão dos pontos ao final da linha. A estratégia adotada nesses casos foi buscar de forma empírica um equacionamento que aumentasse a precisão do cálculo.

O intervalo F6 On - F1 On foi um desses casos. O cálculo anterior consistia no valor da velocidade de *threading* ajustada pelo escorregamento do material e dividida pela distância de F1 a F6. Os resultados obtidos desconsiderando o escorregamento do material mostraram-se melhores. Apesar de o intervalo ter aumentado em média 0,62s (o erro médio aumentou de 0,03s para 0,64s), o desvio padrão do erro reduziu de 0,91s para 0,6s e a faixa de valores de erro reduziu de [-7, 4] para [-1, 3].

Outro intervalo cuja precisão melhorou através de ajustes obtidos de experimentação foi F1 Off - CS Off. A alteração consistiu em utilizar uma média ponderada das velocidades de *running* e *threading* como velocidade no intervalo.

Com o ajuste, o intervalo F1 Off - CS Off reduziu em média 3,01s (o erro médio diminuiu de 3,46s para 0,45s), o desvio padrão do erro reduziu de 2,55s para 1,21s e a faixa de valores de erro reduziu de [-5, 11] para [-4, 4].

O ponto F1 Off, obtido a partir do perfil de velocidade, não estava considerando uma melhoria implantada. O perfil de velocidade considerava atingir a velocidade *tail-out* em F6, mas a melhoria implantada passou a considerar que o ponto em que a tira atinge *tail-out* é um pouco antes de F4 para material fino. Adicionalmente, considerava-se a velocidade entre F1 Off e F6 Off fixa igual a *tail-out*. O modelo foi ajustado para passar a considerar a melhoria implantada e também o perfil de velocidade (Figura 9). Com a curva ajustada, F1 Off foi obtido a partir do ponto anterior a F6 Off em que a distância entre os pontos é igual a distância de F1 a F6, relativa a F6. Esse ajuste aumentou o intervalo em média 0,07s (o erro médio subiu de 0,46s para 0,53s), mas o desvio padrão do erro reduziu de 0,77s para 0,64s e a faixa de valores de erro reduziu de [-2, 5] para [-1, 3].

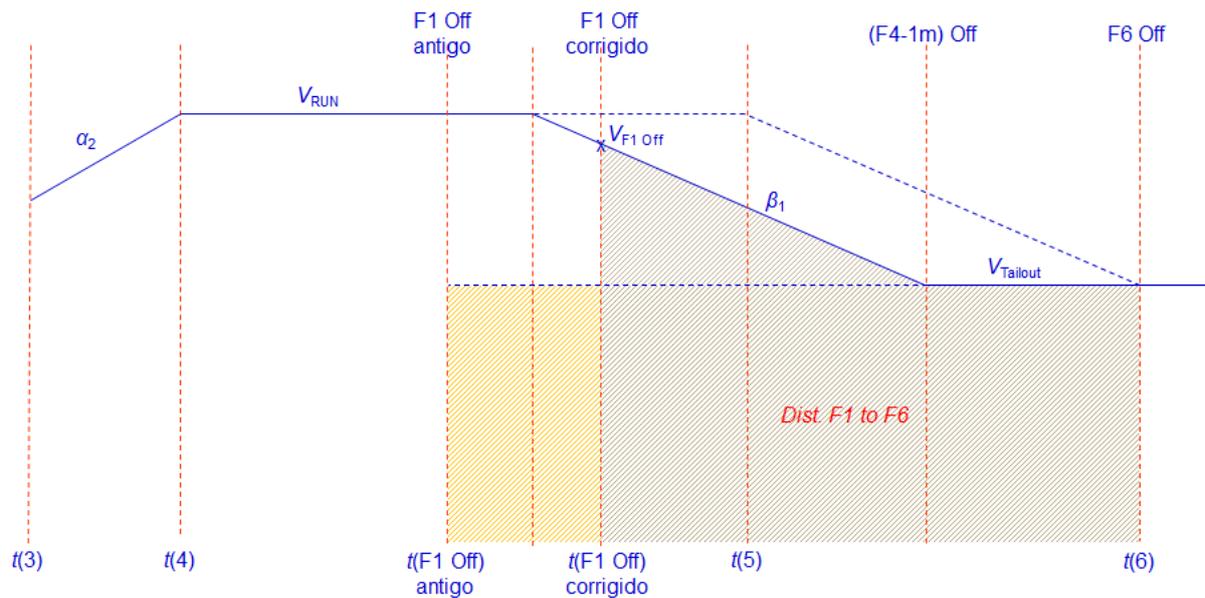


Figura 9. Perfil de velocidade ajustado para o intervalo F6 Off até F1 Off.

De forma análoga ao cálculo do ponto F1 Off, o cálculo de DC Off passou a ser obtido somando-se as distâncias na curva de velocidade a partir de DC sentido F6 até que fosse igual a distância de F6 a DC. O ponto encontrado na curva de velocidade dessa forma (Figura 10) é F6 Off ajustado. Esse ajuste reduziu o intervalo em média 1,26s (o erro médio caiu de 1,79s para 0,53s), o desvio padrão do erro reduziu de 2,89s para 1,31s e a faixa de valores de erro reduziu de [-9, 16] para [-7, 14].

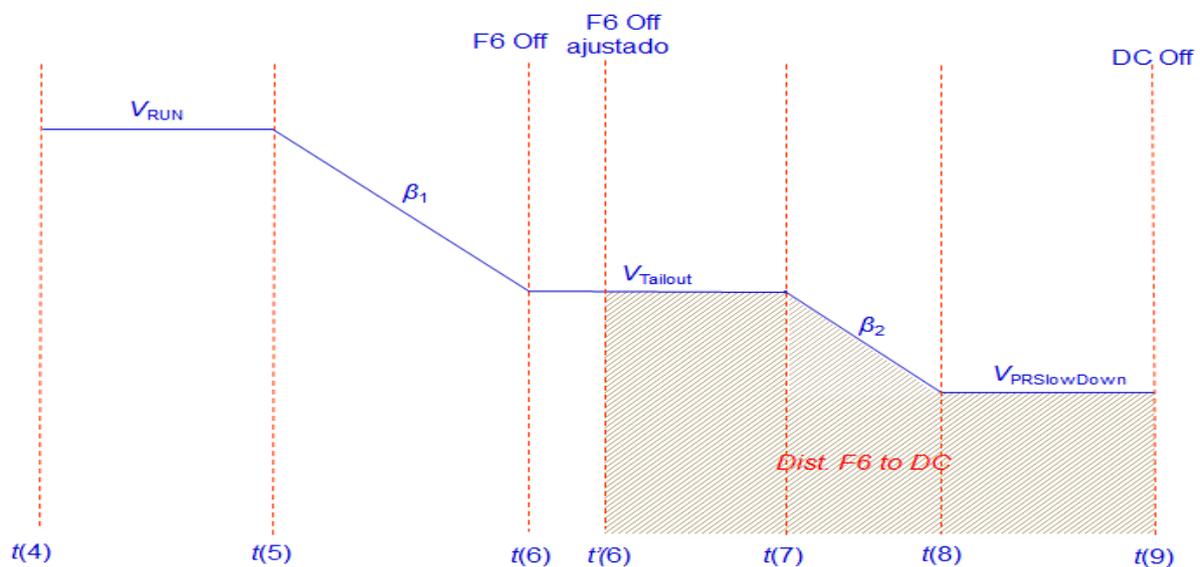


Figura 10. Perfil de velocidade com ajuste no cálculo de F6 Off.

Também foram identificados pontos de melhoria no modelo, como o ajuste da velocidade de *slow-down* da tira ($V_{PRSlowDown}$) e o ajuste dos valores de desaceleração.

Todos esses ajustes foram realizados de forma *off-line* com acompanhamento dos resultados para validação das modificações.

2.2 Outros Ajustes Realizados

Além das modificações para aumento da precisão, alguns ajustes gerais foram realizados no Mill Pacing, ajustes não diretamente relacionados ao cálculo para evitar a colisão na ROT.

2.2.1 Tempo de Transição na Coil-Box

Foi identificado que, quando havia transição de uso para não uso de *Coil-Box*, ou seja, quando a tira anterior usava *Coil-Box* e a tira seguinte não usava *Coil-Box*, era necessária atuação do operador no sentido de evitar que a tira seguinte colidisse com a tira anterior. Na análise do modelo foi verificado que o tempo de ocupação da *Coil-Box* (CB Onf) da tira anterior era menor que o que deveria ser. Isso ocorria porque quando 2 tiras em sequência estavam marcadas para uso de *Coil-Box*, a tira anterior só ocupava a *Coil-Box* até ser colocada no berço de desbobinamento, pois a seguinte já podia ser bobinada na *Coil-Box* sem risco de colisão. Porém, quando a tira seguinte não usa *Coil-Box*, a tira anterior não pode estar ainda desbobinando, pois a tira seguinte precisa da *Coil-Box* livre para passar sem utilizá-la. Foi calculado um *offset* para esses casos e adicionado ao tempo de ocupação da *Coil-Box*.

2.2.2 Ajustes de Parâmetros

Através de medições dos tempos reais foram ajustados no modelo os tempos de ciclo de desenformamento dos fornos de reaquecimento, os tempos de transporte da placa da mesa de desenformamento até o RM e os intervalos entre passes de laminação.

2.2.3 Envio do Ponto de Desaceleração

Como modificação mais recente, o Mill Pacing foi alterado para enviar ao Nível 1 o ponto exato em que se encontra a base da tira no momento em que é iniciada a desaceleração no trem acabador. O cálculo anterior apenas informava em qual cadeira estaria a base da tira no momento de início de desaceleração ou se estava na tesoura, informação imprecisa, pois a desaceleração em muitos casos inicia entre cadeiras.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

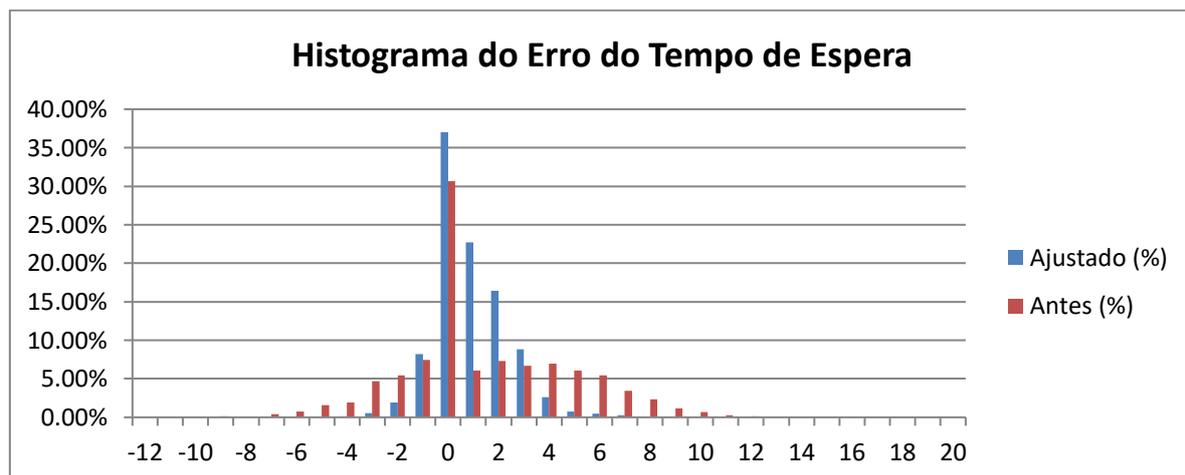
Os ajustes visando aumento da precisão reduziram o desvio padrão do erro em todos os intervalos, bem como reduziram a amplitude do erro em todos os intervalos, como mostra a Tabela 1. Esses ajustes em cada intervalo contribuíram reduzindo o erro médio do tempo de espera de 1,39s para 0,87s e, mais importante, reduzindo o desvio padrão do erro do tempo de espera de 3,4s para 1,48s.

Tabela 1. Análises dos erros dos intervalos

		ERROS CALCULADOS NOS INTERVALOS									Tempo Espera
		CSOn CBun	F1On CSOn	F6On F1On	DCOn F6On	F1Of CSOf	F6Of F1Of	DCOf F6Of	DCOf CSOf	DCOn CBUn	
Média	Ajustado	-0,68	0,94	0,64	-0,14	0,45	0,53	0,53	0,56	-0,70	0,87
	Antes	-0,76	7,28	0,04	-0,69	3,46	0,46	1,79	4,75	4,40	1,39
Desvio Padrão	Ajustado	0,49	0,58	0,60	0,83	1,22	0,64	1,31	1,59	0,87	1,48
	Antes	0,56	2,53	0,91	1,33	2,55	0,77	2,89	4,96	3,34	3,40
Menor	Ajustado	-2	-8	-1	-4	-4	-1	-7	-10	-8	-6
	Antes	-3	-5	-7	-14	-5	-2	-9	-10	-15	-13
Maior	Ajustado	0	2	3	2	4	3	14	17	2	18
	Antes	0	13	4	3	11	5	16	18	14	22

Valores em segundos.

Tal aumento de precisão resultou em 95,72% do erro do tempo de espera entre $\pm 3s$ (antes era 68,36%) e 99,68% entre $\pm 6s$ (antes era 91,1%). O tempo de espera ajustado atingiu 85,41% até 10s (antes era 71,15%), bem mais próximo dos 92,17% reais. Abaixo a Figura 1 mostra o histograma do erro no tempo de espera.

**Figura 11.** Histograma do erro do tempo de espera.

Adicionalmente, desde a implantação dos ajustes em fevereiro/2017 e também influenciado por outros trabalhos realizados no laminador, pode-se notar redução do percentual de vezes em que a linha foi gargalo de produção, conforme Figura 12.

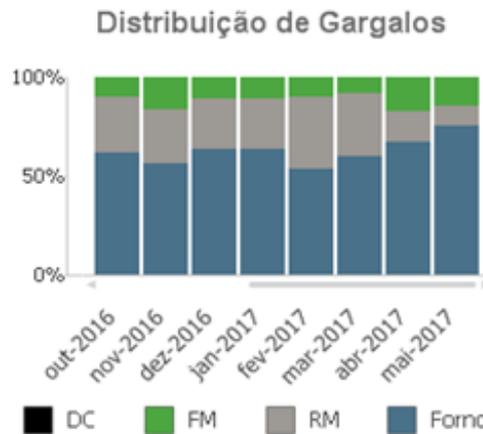


Figura 12. Percentual em que cada equipamento limitou a produção.

Também nota-se a partir de fevereiro/2017 redução do percentual de vezes em que o Mill Pacing foi o último a liberar o desenformamento (Figura 13) e redução do tempo de laminação acima do previsto pelo Mill Pacing (linha vermelha).

Causa do bloqueio do desenformamento



Figura 13. Percentual em que cada condição bloqueou o desenformamento.

A produtividade real (tonelada produzida/hora) e teórica (média da produtividade de cada bobina) também vem apresentando aumento ao longo de 2017 (Figura 14), em parte pelas modificações realizadas no Mill Pacing.

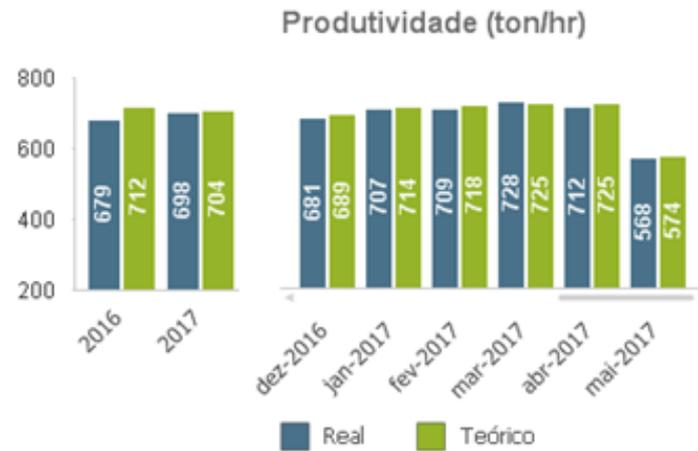


Figura 14. Produtividade Real e Teórica.

4 CONCLUSÃO

Iniciado como uma necessidade de controle para evitar colisão de tiras na região da mesa de resfriamento de tiras, o trabalho realizado no modelo de ritmo do laminador tem permitido uma revisão de diversos cálculos do modelo. Tal revisão, além permitir atingir o objetivo inicial, promove uma atualização do modelo com consequentes ganhos de segurança e produtividade ao longo de toda a linha do laminador de tiras a quente, conforme demonstram os resultados, e que dão base para aumento do ritmo de produção do laminador.

Dado que o processo está em constante mudança (produção de novos materiais, realização de melhorias no modelo de laminação, alteração de parâmetros em equipamentos...), o trabalho de ajuste da precisão do modelo de ritmo do laminador precisa ser revisado continuamente de forma a reduzir *gaps* e aproveitar oportunidades de ganho produtividade que podem surgir no processo. Em um mercado tão competitivo, ganhos de produtividade, sejam elas advindas da melhoria dos modelos envolvidos ou de outras ações, se mostram essenciais.

REFERÊNCIAS

- 1 Toshiba Corporation. Finishing Set Up Calculation Manual. Versão 1.2. Tokyo, 2002.
- 2 TMEIC. FM-511 Slab transfer Setup Data Sending Functional Description. Revisão 8. Tokyo, 2009.