

# SIMULADOR (GÊMEO DIGITAL) DO MODELO MATEMÁTICO DA LINHA DE LAMINAÇÃO À FRIO\*

Henrique Antônio Brum Passo<sup>1</sup>  
Júlio Cezar da Silva Costa<sup>2</sup>  
Cleyton de Souza Lima<sup>3</sup>  
Silas Eduardo De Souza<sup>4</sup>

## Resumo

Foi desenvolvido um simulador do modelo matemático existente no sistema de automação de nível 2 em uma linha de laminação à frio em série (TCM - *Tandem Cold Mill*) na Usiminas em Ipatinga. Esse simulador é importante para prever o comportamento do setup dos equipamentos da linha, aumentando a confiabilidade para realização de testes com novos materiais e melhorando o processo e a qualidade dos produtos devido a maior previsibilidade operacional. A filosofia do sistema baseou-se na metodologia do domínio do problema [1], focando em criar um framework que possa ser utilizado para o desenvolvimento de simuladores com acompanhamento da equipe metalúrgica. Com o uso do framework criado, foi desenvolvido o simulador específico para o laminador. O sistema final obtido é acessível a partir do navegador de internet de qualquer computador da rede interna da Usiminas e foi validado pelos especialistas técnicos do processo.

**Palavras-chave:** Simulação; Laminação à Frio; Framework; Domínio do Problema.

## MATHEMATICAL MODEL SIMULATOR (DIGITAL TWIN) OF TANDEM COLD MILL LINE

### Abstract

A level 2 automation mathematic model simulator was developed for a cold tandem mill (TCM) at Usiminas in Ipatinga. This simulator is important to predict line equipments setup behavior, increasing the reliability for handle tests with new materials and improving process and products quality due to greater operational predictability. The system's philosophy was based on the domain-driven design methodology [1], focusing on creating a framework that can be used for the simulators development with metallurgical team support. Using the created framework, the specific simulator for the laminator was developed. The final system obtained is accessible from the internet browser of any computer on Usiminas internal network and has been validated by the technical experts of the process.

**Keywords:** Simulation; Tandem Cold Mill; Framework; Problem Domain.

<sup>1</sup> Engenharia Elétrica, Analista de Automação, Tecnologia da Informação / Automação, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

<sup>2</sup> Sistemas de Informação, Especialista em Gerenciamento de Projetos, Certificação em Engenharia da Qualidade ASQ-CQE, Analista de Automação, Tecnologia da Informação / Automação, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

<sup>3</sup> Engenharia Elétrica, Certificação em Engenharia da Qualidade ASQ-CQE, Analista de Automação, Tecnologia da Informação / Automação, Usiminas, Ipatinga, Minas Gerais, Brasil.

<sup>4</sup> Estudante de Engenharia de Computação, CEFET-MG, Timóteo, Minas Gerais, Brasil.

## 1 INTRODUÇÃO

A iniciativa de desenvolvimento de um simulador para o modelo matemático do laminador de tiras a frio (TCM) partiu da necessidade da equipe da Unidade Técnica da Laminação a Frio da Usiminas de ter uma ferramenta que permitisse prever o cálculo realizado pelo modelo matemático do sistema de automação de nível 2 presente na linha de produção e com isso ter uma previsibilidade operacional do processo da bobina *full hard* (BFH) no laminador e conseqüentemente poder julgar se o laminador seria capaz de produzir determinada BFH.

Segundo [2] “toda a cadeia de criação pode ser simulada virtualmente na Indústria 4.0. O ambiente virtual pode envolver produtos, materiais, máquinas, processos e pessoas.” Ainda de acordo com [2] “no que diz respeito à aplicação de simulações, outro conceito importante é o gêmeo digital (*digital twin*), que é um simulador de um sistema industrial que usa os dados e sensores para projeção”.

Baseado nessa linha de raciocínio iniciou-se o projeto de desenvolvimento de um gêmeo digital do processo de cálculo do modelo matemático do sistema de automação de nível 2 replicando fielmente as lógicas, parâmetros e dados armazenados no banco de dados de forma sincronizada com o sistema de automação de nível 2.

O simulador foi desenvolvido pela equipe de Automação da Laminação a Frio utilizando a infraestrutura de servidores, linguagens de programação e banco de dados existentes sem a necessidade de aquisição e custos adicionais. O resultado obtido foi um sistema *web-based* disponível em todas as estações internas do sistema Usiminas facilitando o seu uso pela equipe da Unidade Técnica.

## 2 DESENVOLVIMENTO

A primeira etapa do projeto foi identificar e levantar os requisitos funcionais e não funcionais do simulador, como resultado desse levantamento ficou definido a estruturação de um *framework* com requisitos comuns para futuros simuladores.

De acordo com [3] “*framework* é um projeto reutilizável de todas as partes de um sistema que é representado por um conjunto de classes abstratas e a forma como suas instâncias interagem”.

Na segunda etapa foi levantado, com base no *framework* descrito acima, quais funcionalidades seriam desenvolvidas para que o simulador replicasse fielmente as rotinas de cálculo do modelo matemático presente no sistema de automação de nível 2. Uma vez definidas iniciou-se o projeto de prototipação das interfaces que facilitasse o uso do simulador e atendesse as funcionalidades previstas.

Na prototipação das telas do simulador foi utilizado a técnica de prototipação evolutiva que segundo [4] “... é a abordagem na qual os protótipos serão evoluídos até se tornarem prontos para compor a versão final do *software*. São elaborados com a própria ferramenta de desenvolvimento de *software*”.

Na terceira etapa para o desenvolvimento do *software* do simulador foram utilizadas ferramentas como Django Framework, MongoDB e MySQL. Para hospedar o sistema foi utilizado um servidor virtual com sistema operacional Ubuntu. Todo desenvolvimento foi compartilhado com a equipe de desenvolvimento através do GitHub, que permitiu controlar as versões, backups e compartilhamento das modificações.

De acordo com [5] “GitHub é um sistema de gerenciamento de projetos e versões de códigos assim como uma plataforma de rede social criado para desenvolvedores.” Ainda segundo [5] “ele permite que você trabalhe em projetos colaborativos com desenvolvedores de todo o mundo, planeje seus projetos e acompanhe o trabalho.”

Durante e depois do desenvolvimento o sistema foi liberado no ambiente de homologação para que a equipe da Unidade Técnica fizesse os testes de usabilidade, performance e qualidade. Nessa etapa surgiram solicitações de mudança que foram atendidas respeitando o escopo inicial definido.

## 2.1 Métodos de cálculo do modelo matemático do laminador e a importância da sincronização da base de dados.

O modelo matemático do Laminador de Tiras a Frio nº1 da Usiminas possui duas formas de cálculo que são denominadas modelo V3 e modelo V4, devido a lógica e fórmulas de cálculo serem distintas, foi necessário replicar os dois modos de cálculos no simulador, conforme pode ser visto na figura 1.



**Figura 1.** Interface principal do simulador.

O cálculo do modelo matemático do Laminador é complexo e possui diversas tabelas no banco de dados do sistema de automação que são populadas à medida que as bobinas *full hard* (BFH) são processadas na linha de produção. Esse histórico dos dados de processo é fundamental para os modos de cálculo do laminador, principalmente o Modelo V3.

A sincronização da base de dados do simulador com a base de dados do sistema de automação de nível 2 foi fundamental para garantir que o simulador apresentasse resultado concisos, por usar tabelas que são dinamicamente populadas.

## 2.2 Estrutura do *framework* base

O *framework* base do simulador dispõe de funções comuns que podem ser usadas para construção de outros simuladores de outros modelos matemáticos e foi implementado utilizando o paradigma de orientação à objetos. Ele foi baseado no domínio de simulações de *setup* de equipamentos de automação. Seu desenvolvimento foi realizado conjuntamente com a equipe da Unidade Técnica, baseado nas suas principais demandas quando realizam consultas metalúrgicas que são: estratificação de dados, comparação entre resultados e visualização gráfica.

A principal estrutura desenvolvida consiste em um pipeline de passos de cálculo que devem ser executados sequencialmente, conforme a figura 2. Seus métodos principais consistem em gerar relatórios de cada passo e da simulação inteira, salvar simulações já realizadas e retornar todos os valores das simulações executadas. Ele também apresenta funções de retorno que podem ser executadas diretamente pelo *frontend*, facilitando a construção de telas específicas. Além disso, foram criadas várias telas que são comuns a simulações diversas como telas de execução da simulação, de comparação entre resultado e de geração de relatórios.



**Figura 2.** Estrutura principal do *framework* desenvolvido.

## 2.3 Estrutura do simulador do modelo matemático

O simulador foi projetado seguindo o padrão de desenvolvimento MTV (*Model-Template-View*) já estruturada dentro do Framework Django com a filosofia DRYP (*Don't Repeat Yourself*) aproveitando ao máximo a reusabilidade de código. O padrão MTV se assemelha ao padrão MVC (*Model-View e Controller*) como pode ser visto na tabela 1.

Padrão MVC	Padrão MTV	Descrição
Model	Model	É a camada de acesso a base de dados
View	Template	É a camada de visualização das informações que são apresentadas ao usuário
Controller	View	É a camada responsável pelas regras de negócio

Tabela 1. Tabela comparativa dos padrões MTV e MVC.

Segundo [6] dentre as vantagens de se utilizar o padrão MVC estão:

- Simplicidade na manutenção, devido o sistema estar totalmente separado em camadas com as funções bem definidas;
- Permite alterações no *frontend* sem interferir na lógica *backend* e vice-versa;
- O *Controller* pode ser alterado sem interferir nas lógicas do *View* e *Model*.

Uma vez definido o padrão de desenvolvimento foi traçado um plano de desenvolvimento do modelo, conforme pode ser visto resumidamente na figura 3:

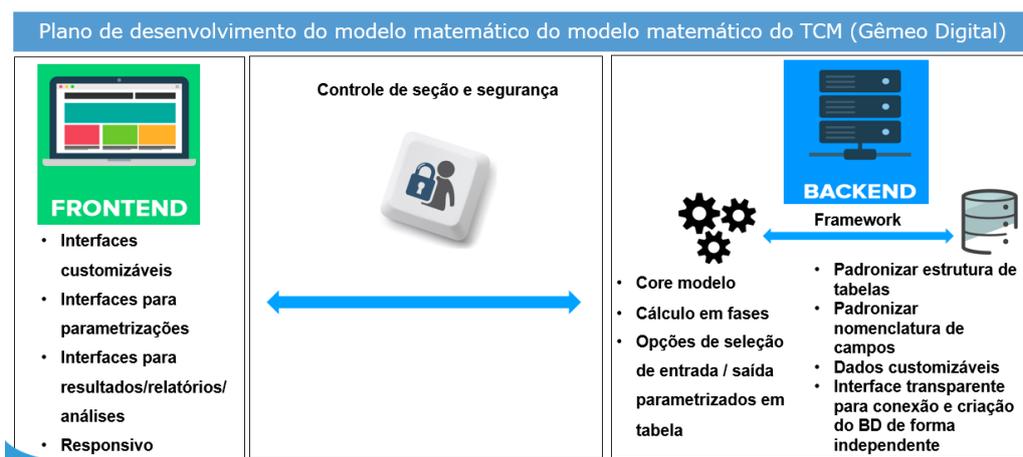


Figura 3. Plano básico de estruturação e desenvolvimento do simulador.

A figura 4 traz o fluxo simplificado da execução do simulador desenvolvido.

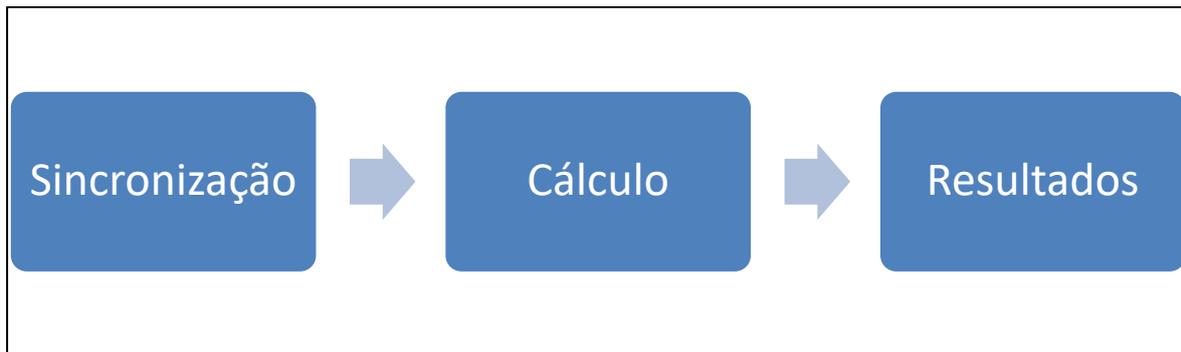


Figura 4. Fluxo básico de execução do simulador.

## 2.4 Interfaces principais do simulador

O simulador possui duas interfaces principais de entrada de dados, uma para o modelo V3 e outra para o modelo V4. Ao acessar essas interfaces o sistema automaticamente sincroniza a base de dados com o sistema de automação de nível 2 permitindo fazer uma simulação com dados mais recentes. A figura 5 demonstra a interface de entrada de dados do modelo V3.

### Simulação do Modelo V3

Identificação da simulação:  Última simulação - MongoDB id:

**Dados da Bobina:** + 

000000 | Dureza : 14 | Espessura da BQ (µm): 4200 | Largura da BQ (mm): 1310 | Espessura da BFH (µm): 1515 | Grupo de Aço : 1AA-QC0000 ▾

Dureza:  Espessura da BQ (µm):  Largura da BQ (mm):  Espessura da BFH (µm):  Grupo de Aço:

**Dados da cadeira 1:** +  **Dados da cadeira 2:** + 

Diâmetro do Cilindro (mm): 534.8 | Tipo : F ▾ Diâmetro do Cilindro (mm): 546.9 | Tipo : F ▾

Diâmetro (mm):  Tipo:  Diâmetro (mm):  Tipo:

**Dados da cadeira 3:** +  **Dados da cadeira 4:** +  **Dados da cadeira 5:** + 

Diâmetro do Cilindro (mm): 560.1 | Tipo : F ▾ Diâmetro do Cilindro (mm): 575.4 | Tipo : F ▾ Diâmetro do Cilindro (mm): 580.6 | Tipo : F ▾

Diâmetro (mm):  Tipo:  Diâmetro (mm):  Tipo:  Diâmetro (mm):  Tipo:

Coefficientes da família: + 

----- ▾

Figura 5. Interface de entrada de dados do modelo V3.

Outra função importante que o simulador oferece são as tabelas de parâmetros de laminação e coeficientes do modelo matemático que podem ser alteradas e os resultados do cálculo podem comparados de forma visual através de gráficos.

O simulador foi estruturado para executar o cálculo do modelo em etapas e apresentar os resultados dessas etapas de forma estratificada em tabelas e com a explicação do cálculo através das fórmulas matemáticas utilizadas no modelo, facilitando assim o entendimento da equipe da Unidade Técnica, conforme pode ser visto na figura 6:

	cadeira 1	cadeira 2	cadeira 3	cadeira 4	cadeira 5
Taxas de redução (%)	19.74	26.61	22.29	18.87	10.45
alongamentos (mm)	1.25	1.65	2.10	2.56	2.77



## Passo 5 - Cálculo das Espessuras de Saída de Cada Cadeira

Calcula as espessuras de saída de cada cadeira.

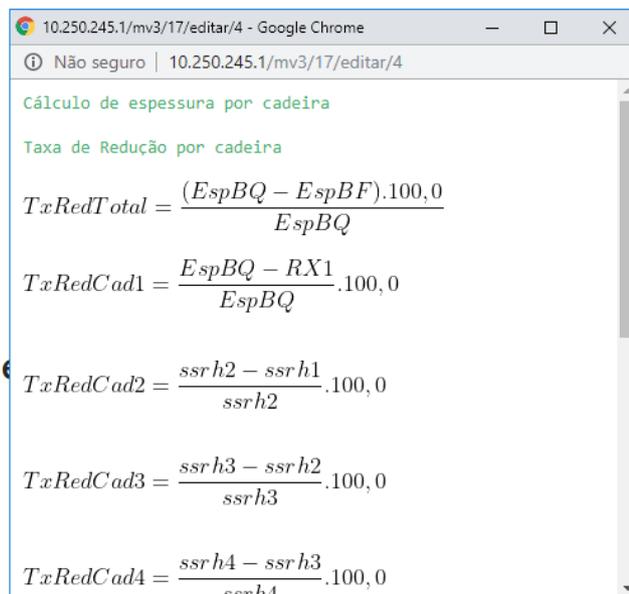
	espessuras
1	3371.71
2	2553.09
3	2001.75
4	1640.89
5	1515.00



## Passo 6 - Cálculo das Tensões

Calcula as tensões entre as cadeiras.

	valores
Tensão unitária na desbobinadeira (Ton)	2.50
Tensão na desbobinadeira (Ton)	25.00
Tensão na desbobinadeira corrigida (Ton)	1000.00
set Tensão na desbobinadeira (Ton)	99.00
Tensão unitária na bobinadeira (Ton)	2.70
Tensão na bobinadeira (Ton)	53.59



10.250.245.1/mv3/17/editar/4 - Google Chrome

Não seguro | 10.250.245.1/mv3/17/editar/4

Cálculo de espessura por cadeira

Taxa de Redução por cadeira

$$TxRedTotal = \frac{(EspBQ - EspBF) \cdot 100,0}{EspBQ}$$

$$TxRedCad1 = \frac{EspBQ - RX1}{EspBQ} \cdot 100,0$$

$$TxRedCad2 = \frac{ssrh2 - ssrh1}{ssrh2} \cdot 100,0$$

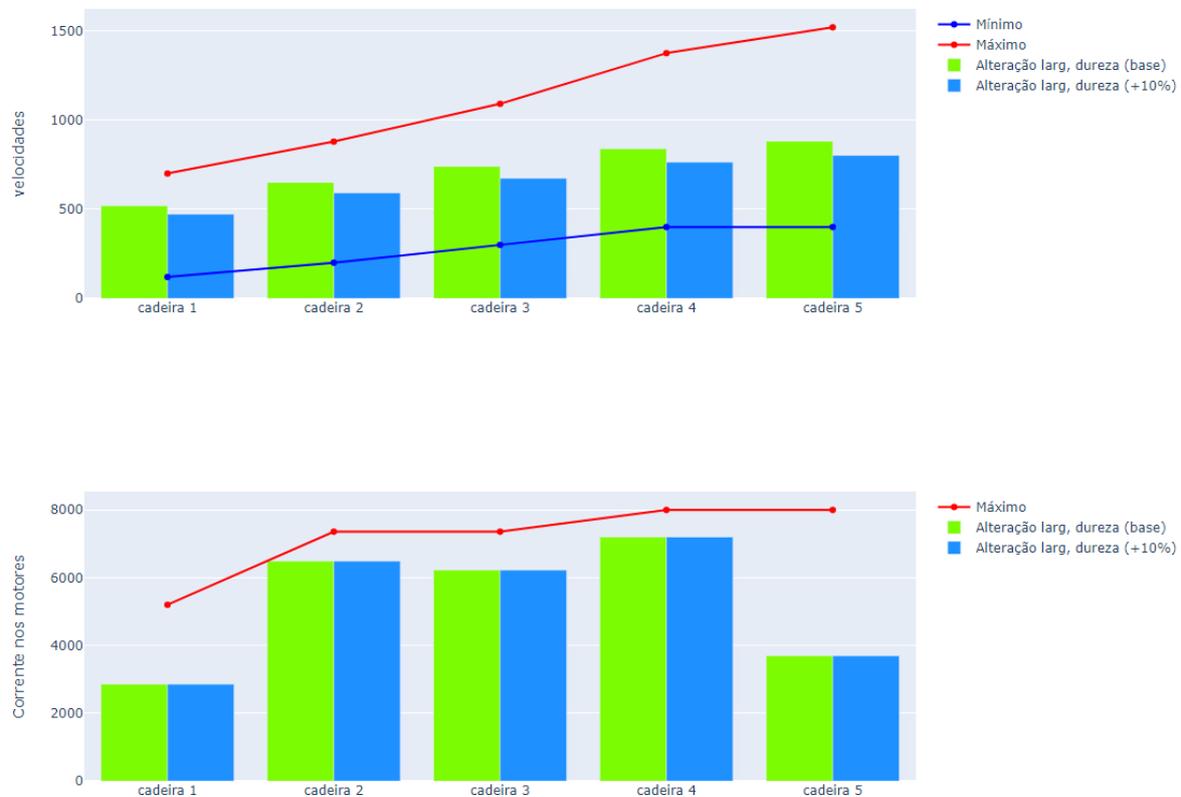
$$TxRedCad3 = \frac{ssrh3 - ssrh2}{ssrh3} \cdot 100,0$$

$$TxRedCad4 = \frac{ssrh4 - ssrh3}{ssrh4} \cdot 100,0$$

Figura 6. Interface de resultado do simulador.

O simulador permite gravar as simulações realizadas para futura comparação através de interface com gráficos, conforme pode ser visto na figura 7. Essa funcionalidade é importante para equipe da Unidade Técnica na tomada de decisão de qual modo ou parâmetros são mais adequados para o processo de determinada BFH de uma consulta metalúrgica.

## Gráficos



**Figura 7.** Interface de comparação de simulações.

Além da possibilidade de impressão de todas as telas para PDF o simulador também gera um arquivo do resultado das simulações que podem ser importados no Microsoft Excel ou PowerBI para outras análises.

## 3 CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse projeto foi desafiador devido a complexidade de sua estruturação, o que demandou uma elaboração de requisitos detalhada e estudo profundo das fórmulas e métodos de cálculo para implementação no simulador.

O resultado alcançado foi considerado um sucesso pelos envolvidos, o que irá trazer ganhos em termos de agilidade no julgamento de novos materiais e otimização do modelo matemático atual do laminador de tiras a frio nº 1 da Usiminas. Os ganhos esperados são a melhor assertividade do *setup* dos equipamentos e como consequência a redução das quedas de qualidade e sucateamento.

O projeto teve uma equipe multidisciplinar para o seu desenvolvimento, incluindo os especialistas de processo da unidade técnica da Laminação a Frio e os especialistas do sistema de automação de nível 2. Essa equipe foi fator determinante para que o projeto fosse concluído dentro do escopo solicitado e no prazo de seis meses concomitante com as atividades diárias dos envolvidos.

## REFERÊNCIAS

- 1 EVANS, Eric J.; EVANS, Eric. **Domain-driven design: tackling complexity in the heart of software**. Addison-Wesley Professional, 2004.
- 2 SANTOS, Givanildo Alves. **Tecnologias mecânicas: materiais, processos e manufatura avançada**. Editora Érica, 2021
- 3 JOHNSON, Ralph E. **Frameworks = (Components + Patterns)**. **Communications of the ACM**, Vol. 40. No 10, Outubro 1997.
- 4 VAZQUEZ, Carlos Eduardo, SIMÕES, Guilherme Siqueira. **Engenharia de requisitos: software orientado ao negócio**. Editora Brasport, 2016.
- 5 LONGEN, Andrei. O que é Github e para que é usado. Hostinger, 2020. Disponível em: <<https://www.hostinger.com.br/tutoriais/o-que-github/>>. Acesso em: 10 de fev. 2021.
- 6 GIRIDHAR, Chetan. **Aprendendo padrões de projeto em Python**. Novatec Editora, 2016.]