

GreyBeer gPROMS Engine: Modelagem Dinâmica e Aplicações Avançadas de Simulação

Dr. Eng. José Octávio Sierra Fernandez (e-mail; j.fernandez@greylogix.com.br)

Departamento de Engenharia de Processos (Florianópolis-SC; Brasil)

website: <https://greybeer.com.br/>

Introdução

A produção de cerveja é um processo complexo, composto por fenômenos físico-químicos e bioquímicos que ocorrem ao longo de diversas etapas — mosturação, clarificação, fervura, resfriamento e fermentação. Cada uma dessas fases apresenta forte sensibilidade a parâmetros operacionais, como temperatura, composição do mosto, qualidade da matéria-prima, taxa de inoculação, intensidade de fervura e eficiência térmica. Essa sensibilidade torna o processo cervejeiro altamente dependente de controle, consistência e precisão.

Ao mesmo tempo, a crescente competitividade do setor exige que as cervejarias busquem eficiência energética, previsibilidade de qualidade e redução de variabilidade entre lotes. Entretanto, a natureza intrinsecamente lenta do processo — especialmente na etapa de fermentação, que pode se estender por semanas — dificulta a tomada de decisão rápida e torna custoso testar novos parâmetros operacionais por tentativa e erro.

É nesse cenário que surge o **GreyBeer gPROMS Engine**, uma solução avançada baseada em modelagem fenomenológica e simulação computacional de alta fidelidade. Desenvolvido na plataforma **gPROMS**, da Siemens, o GreyBeer Engine permite representar matematicamente todas as principais etapas do processo cervejeiro, possibilitando a simulação completa de um lote em poucos minutos.

Com isso, o modelo não apenas replica o comportamento físico do processo real, mas também antecipa tendências, estima variáveis difíceis de medir (soft sensors), avalia cenários hipotéticos, identifica gargalos operacionais e apoia decisões estratégicas de otimização. A integração entre rigor científico e aplicabilidade industrial transforma o **GreyBeer gPROMS Engine** em um pilar para a

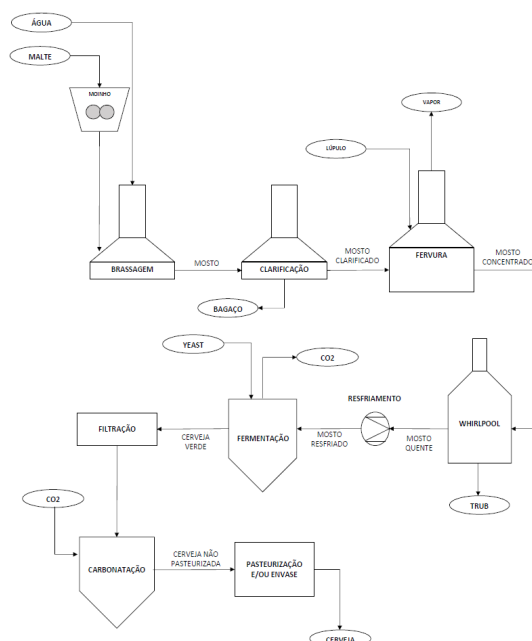


Figure 1: Fluxograma simplificado do processo cervejeiro utilizado como estudo de caso.

Cervejaria 4.0 e para o avanço digital do setor cervejeiro brasileiro.

O GreyBeer gPROMS Engine: Visão Geral

O **GreyBeer gPROMS Engine** é uma plataforma avançada de modelagem dinâmica capaz de representar, com elevada fidelidade, os fenômenos físico-químicos e bioquímicos que regem o processo cervejeiro. Baseado na tecnologia **gPROMS**, da Siemens, o motor de simulação integra balanços de massa, energia, cinéticas enzimáticas e microbianas, transferência de calor, formação de vapor e dinâmica operacional de processos em batelada.

Sua arquitetura permite combinar **modelos fenomenológicos rigorosos**, baseados em leis fundamentais da engenharia química,

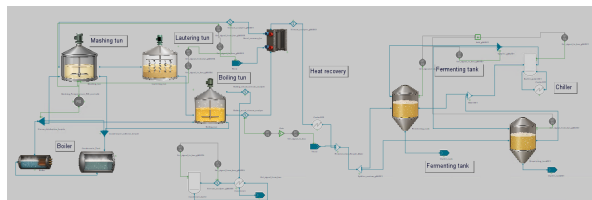


Figure 2: Topologia completa do processo cervejeiro modelado no GreyBeer gPROMS Engine, incluindo mosturação, clarificação, fervura, recuperação de calor, resfriamento e fermentação.

com **modelos híbridos orientados por dados**, permitindo capturar comportamentos complexos sem depender de grande volume de medições experimentais. Isso reduz custos, acelera desenvolvimento e possibilita análises robustas mesmo em cenários onde dados reais são limitados.

Modelagem orientada a fenômenos reais

Os modelos implementados utilizam equações diferenciais derivadas das leis de conservação de massa, energia e balanços molares, garantindo consistência física e capacidade de extrapolação. Parâmetros têm significado físico e podem ser calibrados em pequena escala e aplicados diretamente a processos industriais completos, sem necessidade de retrabalho.

Aplicação transversal em P&D, projeto e operação

A plataforma atende simultaneamente às necessidades de:

- **Pesquisa e Desenvolvimento:** permite realizar ensaios *in silico* em minutos, reduzir experimentação física e acelerar inovação.
- **Engenharia e Projeto:** auxilia na avaliação energética, no dimensionamento conceitual, na análise de gargalos e no teste de alternativas operacionais.
- **Operação:** fornece previsão de comportamento (forecasting), sensores virtuais (soft sensors), padronização via scheduling e suporte à tomada de decisão.

Base para Digital Twins industriais

O GreyBeer gPROMS Engine constitui o núcleo de um *digital twin* cervejeiro dinâmico,

capaz de replicar, prever e otimizar o comportamento do processo em tempo real. Ele proporciona:

- simulação completa de um lote em poucos minutos;
- análise preditiva da fermentação;
- estimativa de variáveis não medidas (densidade, pH, Brix);
- testes virtuais de operação antes da execução real;
- mapeamento de sensibilidade e otimização global.

A seguir são apresentadas as principais aplicações práticas que derivam dessa arquitetura e que serão demonstradas no contexto do processo cervejeiro GreyBeer.

Aplicações Práticas do GreyBeer gPROMS Engine

A arquitetura do **GreyBeer gPROMS Engine** permite a aplicação de técnicas avançadas de simulação e análise de processos, alinhadas às quatro vertentes tecnológicas centrais promovidas pela Siemens para transformação digital de plantas industriais. Estas funcionalidades agregam valor direto às áreas de P&D, engenharia, operação e controle de qualidade dentro de uma cervejaria industrial.

As subseções a seguir apresentam cada uma dessas aplicações, com enfoque específico no processo cervejeiro.

Forecasting: Previsão de Comportamento do Processo

A simulação dinâmica permite prever, em poucos minutos, o comportamento de etapas que na operação real levam dias ou semanas. No contexto cervejeiro, essa capacidade é particularmente relevante para a etapa de fermentação.

O modelo prevê a evolução temporal de variáveis como:

- açúcares fermentáveis (glicose, maltose e maltotriose);
- formação de etanol e CO₂;
- crescimento de biomassa;

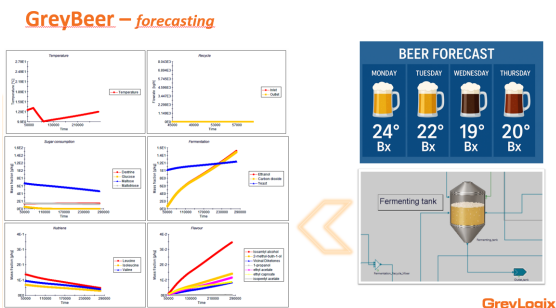


Figure 3: Curva prevista da fermentação obtida pelo GreyBeer gPROMS Engine, ilustrando a evolução de etanol, dióxido de carbono e biomassa ao longo do tempo.

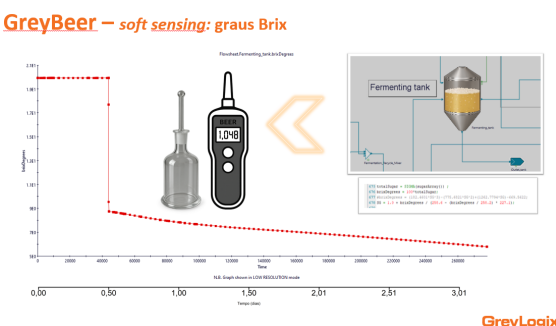


Figure 4: Estimativa de graus Brix ao longo da fermentação utilizando soft sensing baseado em modelo. (Placeholder — versão final será revisada pelo time)

- densidade e extrato;
- consumo de aminoácidos essenciais.

Essa previsão permite verificar se o fermentador está “on track” em relação ao comportamento esperado, antecipando desvios operacionais e permitindo ações corretivas de forma proativa.

Soft Sensors: Estimativa de Variáveis Não Medidas

O GreyBeer gPROMS Engine possibilita a criação de *soft sensors*, isto é, sensores virtuais capazes de estimar variáveis que não são medidas diretamente no processo.

Entre as variáveis estimáveis destacam-se:

- **densidade** do mosto/cerveja durante a fermentação;
- **pH**, estimado a partir da dinâmica bioquímica;

- **graus Brix**, calculados com base na composição instantânea.

Esses sensores reduzem a necessidade de coleta manual de amostras, diminuem variabilidade analítica e aumentam a disponibilidade de informações em tempo real para operadores e engenheiros.

Scheduling: Automação Procedural Baseada em Modelo

O gPROMS permite estruturar um roteiro completo de execução do processo cervejeiro, representando logicamente cada etapa da operação. Com isso, o **scheduling** fornece:

- padronização das rampas de mosturação e descansos enzimáticos;
- gatilhos de transferência entre etapas;
- controle sobre adição de vapor na fervura;
- comandos condicionais para resfriamento e inoculação.

Essa funcionalidade viabiliza maior repetibilidade operacional e cria um ambiente no qual operadores trabalham de forma assistida por modelo.

Global System Analysis (GSA) e Otimização

A análise global do sistema permite avaliar a sensibilidade do processo em relação a múltiplos parâmetros simultaneamente. Essa abordagem identifica quais variáveis de entrada exercem maior influência sobre indicadores-chave de desempenho (KPIs) da produção.

Entre as aplicações práticas destacam-se:

- otimização das rampas de mosturação para maximizar fermentabilidade;
- avaliação da influência da granulometria do malte;
- redução do consumo de vapor na fervura;
- impacto da relação água/malte sobre o extrato final;
- identificação de gargalos térmicos em trocadores de calor.

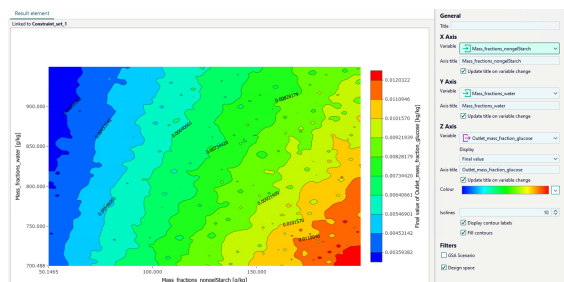


Figure 5: Mapa de contorno mostrando a influência combinada da fração mássica de amido não-gelatinizado e da fração mássica de água sobre a concentração final de glicose.

Esse módulo permite testar centenas de cenários de forma automatizada, suportando tomadas de decisão estratégicas baseadas em dados e fenômenos reais.

Estudos Demonstrativos

Nesta seção são apresentados resultados selecionados obtidos a partir do GreyBeer gPROMS Engine, com o objetivo de ilustrar o comportamento dinâmico das principais etapas do processo cervejeiro e demonstrar a aderência dos modelos à realidade operacional.

Mosturação

A etapa de mosturação foi modelada considerando a ação enzimática sobre o amido e a formação de açúcares fermentáveis. Os resultados simulados demonstram:

- evolução temporal das conversões enzimáticas;
- impacto das rampas de temperatura sobre a atividade enzimática;
- formação progressiva de glicose, maltose e maltotriose;
- correlação entre temperatura, pH e eficiência de conversão.

Fervura

A modelagem da fervura inclui balanço energético completo, transferência de calor e formação de vapor. Os resultados evidenciam:

- perfis de temperatura ao longo do tempo;

- fração de vapor gerada e taxa de evaporação;
- influência da potência térmica aplicada;
- efeitos sobre o extrato devido à concentração do mosto.

Fermentação

A fermentação foi representada por um modelo cinético detalhado, contemplando o consumo sequencial de açúcares, formação de biomassa, produção de etanol e CO_2 . Os principais resultados incluem:

- curvas de consumo de glicose, maltose e maltotriose;
- evolução de biomassa e fatores de conversão;
- formação de etanol e CO_2 ao longo do tempo;
- comparação entre dados simulados e referências externas, demonstrando coerência do modelo.

Cada um desses resultados reforça a capacidade do GreyBeer gPROMS Engine em capturar fenômenos complexos com fidelidade adequada para análise, previsão e otimização do processo cervejeiro.

Integração Energética (Heat Integration)

A dinâmica térmica da fervura oferece uma oportunidade significativa de recuperação de calor. Durante a evaporação do mosto, a fração de vapor gerada carrega energia substancial que, em muitas cervejarias, é simplesmente descartada para a atmosfera.

Com o **GreyBeer gPROMS Engine**, é possível modelar e quantificar a eficiência de sistemas de *heat integration*, nos quais o condensado quente proveniente do topo da fervura é resfriado em trocadores de calor dedicados. Esse calor é então transferido para água fria de processo, produzindo água quente que pode ser utilizada em:

- sistemas de CIP (Cleaning in Place);
- lavagem e sanitização de tanques;
- pré-aquecimento de água de mosturação;

- demandas térmicas auxiliares da planta.

Os cenários simulados permitem avaliar:

- o potencial real de recuperação de energia por batelada;
- a redução da carga térmica sobre a caldeira;
- a diminuição do consumo de gás natural, biomassa ou vapor vivo;
- configurações alternativas de trocadores de calor e modos de operação;
- impactos sobre o balanço térmico global da fábrica.

Essa capacidade transforma a modelagem em uma ferramenta objetiva para tomada de decisão em sustentabilidade, eficiência energética e otimização de utilidades.

Conclusões

A aplicação do **GreyBeer gPROMS Engine** demonstra o potencial transformador da modelagem fenomenológica e da simulação dinâmica em processos industriais complexos. Embora este white paper tenha utilizado o contexto cervejeiro como estudo de caso, os conceitos apresentados — previsão de comportamento, sensores virtuais, automação procedural e análise global do sistema — são amplamente aplicáveis em diversos segmentos da indústria de processos.

A abordagem dinâmica baseada em modelos fundamentados nas leis da engenharia química permite:

- reduzir a necessidade de experimentação física e acelerar o desenvolvimento de novos processos;
- antecipar tendências e desvios operacionais por meio de modelos preditivos;
- estimar variáveis críticas não medidas via *soft sensors*;
- padronizar rotinas operacionais usando *scheduling* e procedimentos baseados em modelo;
- aplicar análises de sensibilidade e otimização a processos térmicos, biológicos ou químicos;

- avaliar cenários de eficiência energética e integração térmica em diferentes sistemas industriais.

Ao reunir essas capacidades, a plataforma posiciona-se como uma ferramenta essencial para aumentar maturidade operacional, reduzir custos, melhorar previsibilidade e apoiar iniciativas de digitalização industrial.

Próximos Passos: Implementação de Prova de Conceito (POC)

A etapa natural de evolução consiste na execução de uma **Prova de Conceito (POC)** adaptada ao processo específico de interesse da indústria parceira. Uma POC típica envolve:

- definição do escopo e da etapa do processo a ser modelada;
- coleta de dados mínimos necessários para calibração e validação;
- construção ou ajuste do modelo fenomenológico;
- execução de simulações preditivas e análises de sensibilidade;
- avaliação técnica e econômica dos benefícios potenciais da solução.

Esse formato permite demonstrar, de forma prática e direcionada, o valor que a plataforma pode gerar — seja em processos térmicos, biotecnológicos, químicos, petroquímicos, alimentícios ou bioenergéticos.

A flexibilidade da tecnologia garante que o mesmo arcabouço utilizado neste case pode ser aplicado para apoiar decisões operacionais, de engenharia ou de P&D em qualquer indústria de processos.

Sobre a GreyLogix Engenharia

A GreyLogix é Solution Partner da Siemens, com atuação especializada em automação, digitalização industrial e segurança funcional. O time técnico reúne experiência sólida em engenharia de processos, instrumentação e análise de riscos, cobrindo desde estudos conceituais até detalhamento e comissionamento em campo.

A empresa desenvolve soluções completas em gêmeos digitais de processos, integrando ferramentas como gPROMS, SIMIT, COMOS e XHQ para modelagem, simulação dinâmica, otimização e suporte à tomada de decisão em tempo real. Essa abordagem permite avaliar cenários operacionais, reduzir incertezas de projeto e capturar ganhos de eficiência energética e de produtividade.

A GreyLogix atua em diversos segmentos industriais, incluindo papel e celulose, química, óleo e gás, biogás e bioenergia, alimentos e bebidas, entre outros, sempre com foco em projetos sob medida, desenvolvidos em parceria com o cliente e com sólida base técnica em engenharia de processos.
