

# O gerenciamento de projetos na indústria alimentícia com sensores virtuais

Lucien Gormezano, EEM

Leo Kunigk, EEM

Rubens Gedraite, EEM

## 1 Introdução

O gerenciamento de um projeto industrial abrange diversas etapas. A primeira consiste no estudo de viabilidade técnica e econômica. Uma vez que o projeto tenha sido considerado viável, a próxima etapa é o projeto básico. No projeto básico apresentam-se as dimensões principais dos equipamentos considerados e verificados os balanços de massa e de energia de todas as linhas de processo. A próxima etapa consiste no projeto detalhado – nele se pormenorizam todos os equipamentos definidos no projeto básico e as tubulações. Uma vez o projeto ter sido implantado, é feito o comissionamento da instalação e, posteriormente, colocado em operação normal da instalação industrial.

Este trabalho teve por objetivo desenvolver uma abordagem complementar ao assunto, focando o gerenciamento da operação de um equipamento tipicamente usado na indústria de alimentos, que é o sistema de limpeza CIP.

O significativo desenvolvimento de produtos alimentícios industrializados alcançou patamares que exigem das indústrias o emprego de sistemas de envase com grande capacidade de operação e, também, que apresentem elevada disponibilidade.

Neste cenário, o desenvolvimento de um algoritmo para o gerenciamento do sistema de limpeza CIP é importante para permitir prever – com base em ferramenta computacional – o momento mais adequado de interromper o funcionamento do equipamento de processo para a limpeza mecânica dele e/ou para avaliar os sensores tipicamente utilizados.

## 2 Um sistema CIP típico

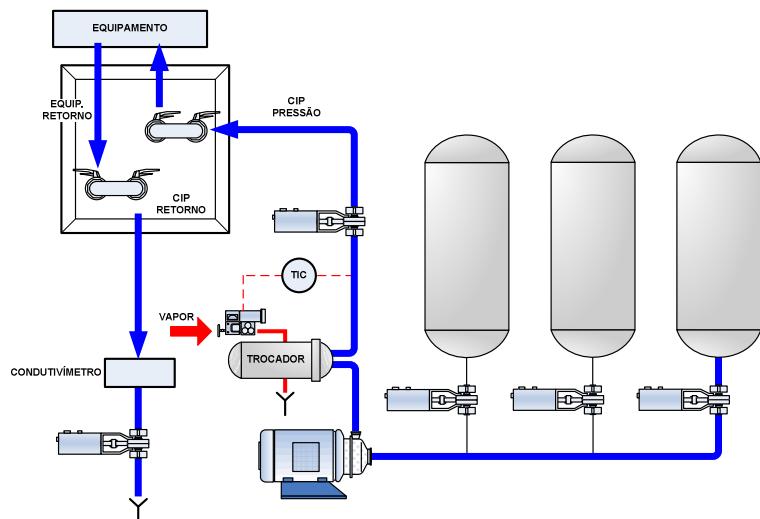
Um sistema de limpeza CIP típico é constituído por: **(i)**- um tanque para armazenar a solução de limpeza (detergente); **(ii)**- um tanque para armazenar água quente; **(iii)**- um tanque para a recuperação da solução detergente que será utilizada na etapa de pré-enxágüe do processo posterior; **(iv)**- bomba(s) centrífuga(s) para o transporte dos fluídos; **(v)**- trocador de calor; **(vi)**- condutivímetro; **(vii)**- controlador e indicador de temperatura; **(viii)**- válvula de controle automático e **(ix)**- válvulas solenóides. Para processos mais complexos podem ser utilizados tanques de solução sanitizante fria (com base de cloro) e de água tratada fria.

O processo de limpeza CIP pode ser executado tanto de forma manual como de forma automática. Nos processos executados de forma manual, é o operador do processo quem executa as manobras necessárias nas válvulas e equipamentos, bem como o controle dos parâmetros do processo, a saber: tempos, temperaturas e concentrações. Nos processos executados de forma automática, é tipicamente empregado um CLP para executar as seqüências de operações requeridas e, assim, realizar um controle total sobre os parâmetros do processo.

Diferentes receitas de controle para sistemas CIP podem ser pré-programadas no CLP, conferindo-lhes uma grande versatilidade para a execução de limpeza em diferentes equipamentos.

Na seqüência será apresentado, de forma simplificada, um sistema CIP composto por três tanques e as etapas típicas que este deve atender (KHS – Ziemann - Lies, s.d.).

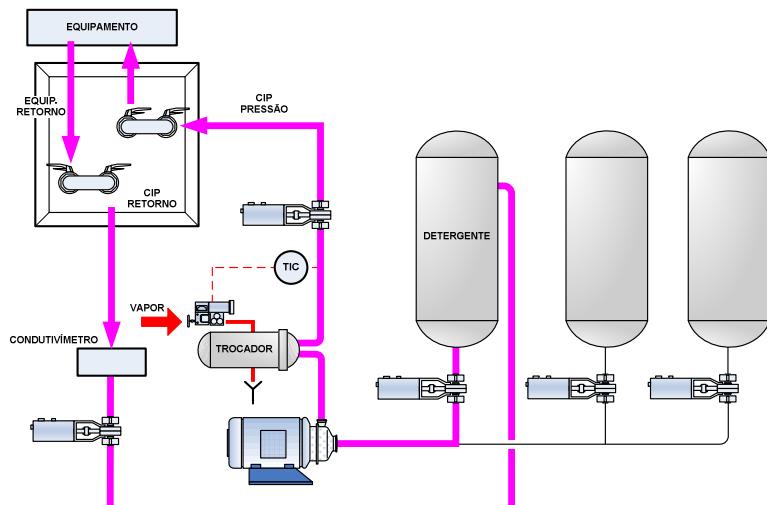
A **primeira etapa** consiste no pré-enxágüe do equipamento do processo com água recuperada proveniente do tanque de água recuperada. Esta pré-lavagem visa remover do equipamento do processo, e também das tubulações, todo material sólido porventura existente e/ou líquidos residuais que ainda permanecem no equipamento do processo e nas tubulações. Adicionalmente, é executado o pré-aquecimento da água de pré-enxágüe para evitar que ocorra o choque térmico no sistema a ser limpo. O aquecimento é feito até a temperatura típica de 50°C, sendo a água recuperada transportada através do sistema formado pelas tubulações e pelo equipamento de processo por meio de bomba centrífuga. A água de pré-enxágüe efluente do equipamento do processo é descartada. A Figura 1 ilustra esta etapa do processo.



**FIGURA 1–** Prê-enxágüe do sistema em estudo com água recuperada

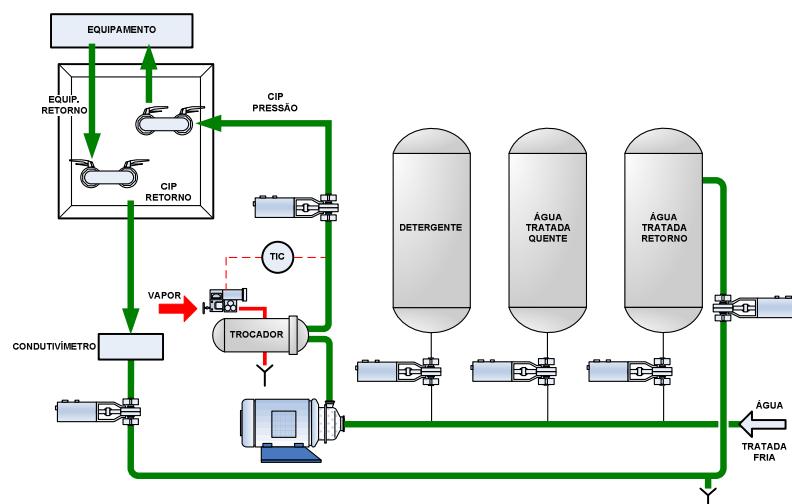
A **segunda etapa** consiste na limpeza do equipamento do processo com uma solução de hidróxido de sódio proveniente do tanque de hidróxido de sódio quente. Nesta etapa, uma solução de hidróxido de sódio (detergente) previamente preparada é encaminhada ao equipamento de processo para

sua limpeza. Esta solução é aquecida até a temperatura adequada de trabalho ( $85^{\circ}\text{C}$ ) e é feito seu escoamento pelo processo em circuito fechado, retornando ao tanque de hidróxido de sódio quente. A Figura 2 ilustra esta etapa do processo.



**FIGURA 2 – Limpeza do sistema em estudo com solução de hidróxido de sódio**

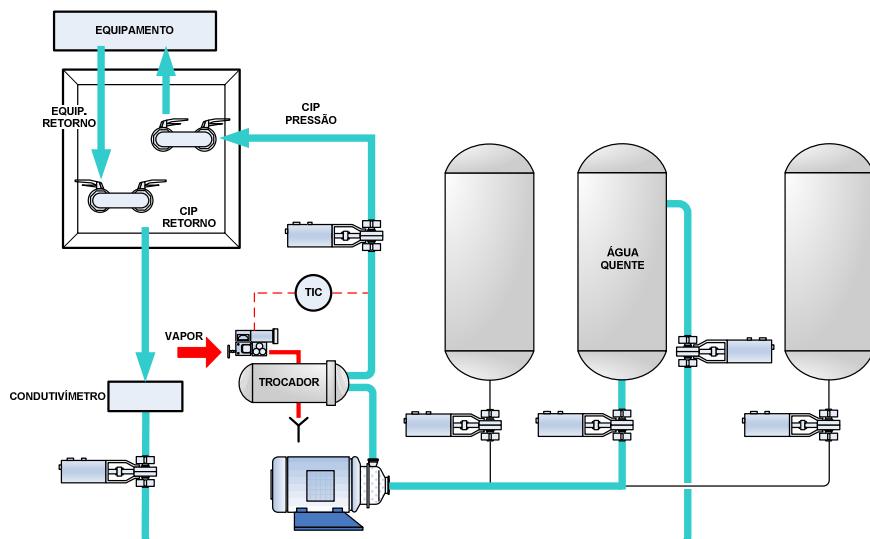
A **terceira etapa** consiste no enxágüe intermediário com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água de enxágüe intermediário é pré-aquecida a  $50^{\circ}\text{C}$  com o objetivo de manter aquecido todo o circuito a ser limpo. A etapa de enxágüe intermediário visa remover o detergente (solução de hidróxido de sódio) do sistema. A água de enxágüe efluente do equipamento de processo é feita com retorno ao tanque de água recuperada, sendo a duração desta etapa definida pela condutividade elétrica da água efluente. A operação é interrompida quando a concentração de resíduos de hidróxido de sódio na água for inferior a um valor mínimo preestabelecido. A Figura 3 ilustra esta etapa do processo.



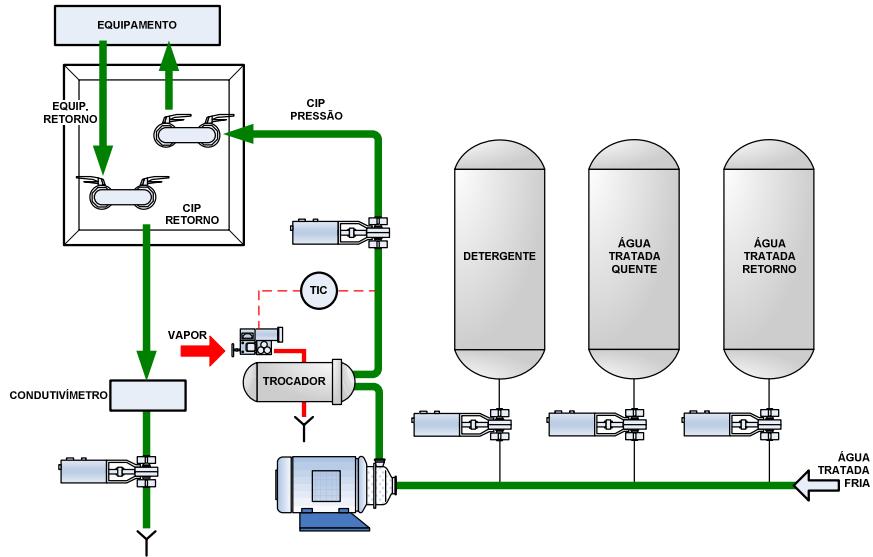
**FIGURA 3 – Enxágüe intermediário do sistema em estudo com água tratada**

A **quarta etapa** consiste na pasteurização do equipamento do processo com o emprego de água quente proveniente do tanque de água quente. Tipicamente, esta água de esterilização do equipamento deve ser pré-aquecida a 90°C e feita circular através do equipamento em circuito fechado durante, pelo menos, 15 minutos. A Figura 4 ilustra esta etapa do processo.

A **quinta etapa** consiste no enxágüe final do equipamento de processo com água tratada proveniente da rede de utilidades. Tipicamente, esta água de enxágüe final é pré-aquecida a 50°C para evitar o choque térmico no equipamento de processo e, na seqüência, deve ser gradualmente resfriada até a temperatura ambiente. Este resfriamento gradual visa promover a diminuição da temperatura do equipamento de processo, deixando-o em condições adequadas de posterior utilização. A água tratada efluente do equipamento do processo pode ser direcionada ao tanque de água recuperada ou descartada para dreno. A Figura 5 ilustra esta etapa do processo.



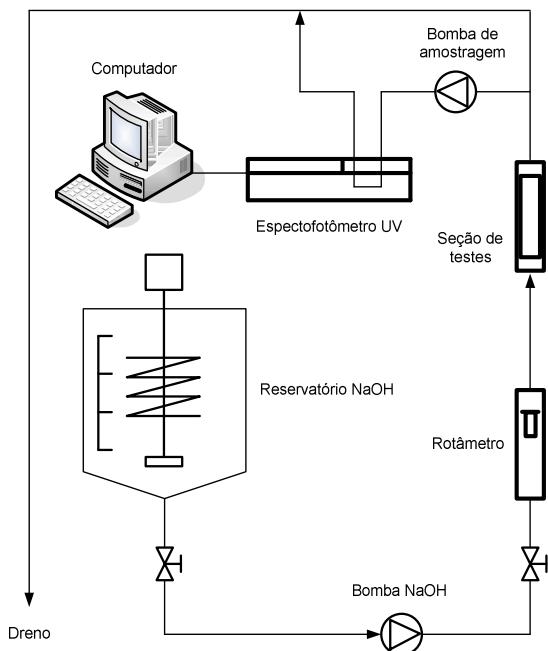
**FIGURA 4 – Pasteurização do sistema em estudo com água quente**



**FIGURA 5 – Resfriamento do sistema em estudo com água tratada da rede**

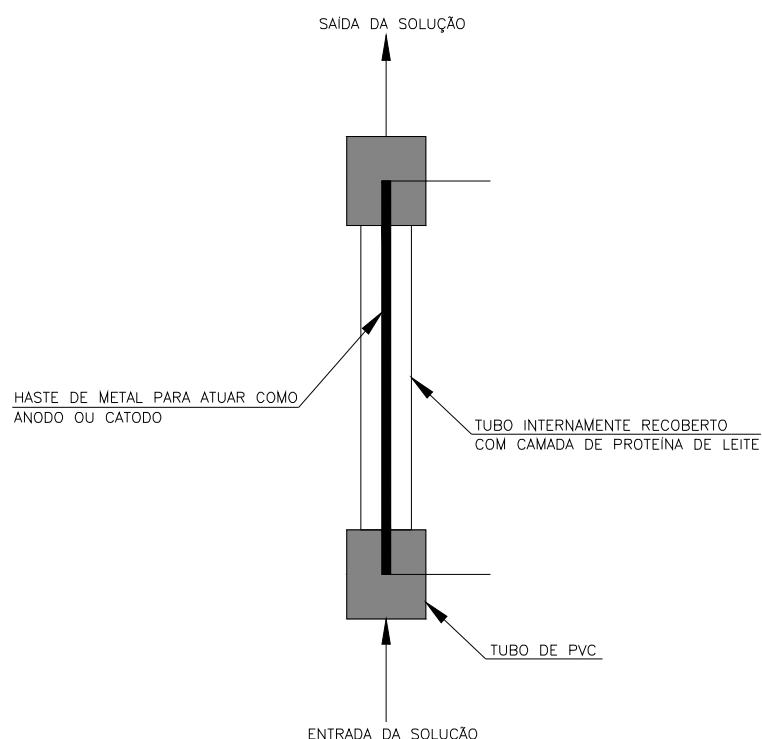
### 3 O protótipo desenvolvido para o estudo da cinética de um sistema CIP típico

GORMEZANO (2007) desenvolveu estudos envolvendo a cinética do processo de limpeza num protótipo de sistema CIP, como se mostra de forma esquemática na Figura 6. Nesta bancada, o interior do tubo de testes foi incrustado com uma solução de leite em pó integral e instantâneo, para reproduzir uma situação tipicamente verificada na indústria alimentícia.



**FIGURA 6 – Protótipo de sistema CIP usado por CHEN *et al.* (2004)**

A **seção de testes** simula um equipamento a ser limpo por um sistema CIP. Os autores usaram um tubo de aço inoxidável de 16 mm de diâmetro interno e de 150 mm de comprimento. Esta seção de testes foi recoberta internamente com uma camada de proteína desnaturada de leite. Foi usado um reservatório com uma solução de hidróxido de sódio equipado com sistema de aquecimento e agitação. Dessa maneira, a temperatura da solução de hidróxido de sódio é mantida praticamente constante. A velocidade de escoamento da solução de hidróxido de sódio é mantida constante por meio de um rotâmetro associado a uma válvula manualmente operada. Após deixar a seção de testes, a solução de hidróxido de sódio efluente escoa através de um espectrofotômetro de absorção UV equipado com sistema de amostragem “on-line”. O comprimento de onda utilizado no espectrofotômetro UV está compreendido entre 248 nm e 256 nm. A amostragem foi realizada em intervalos de 10 segundos entre as leituras. A seção de testes usada por GORMEZANO (2007) é apresentada na Figura 7.



**FIGURA 7 – Seção de testes usada**

Uma vez estabelecido o valor da velocidade de escoamento do fluido de limpeza (detergente), a próxima etapa consistiu na preparação da solução de hidróxido de sódio (NaOH) que foi utilizada como detergente. Esta solução de NaOH foi preparada com concentração de 0,5 % em massa e apresentou pH 13.

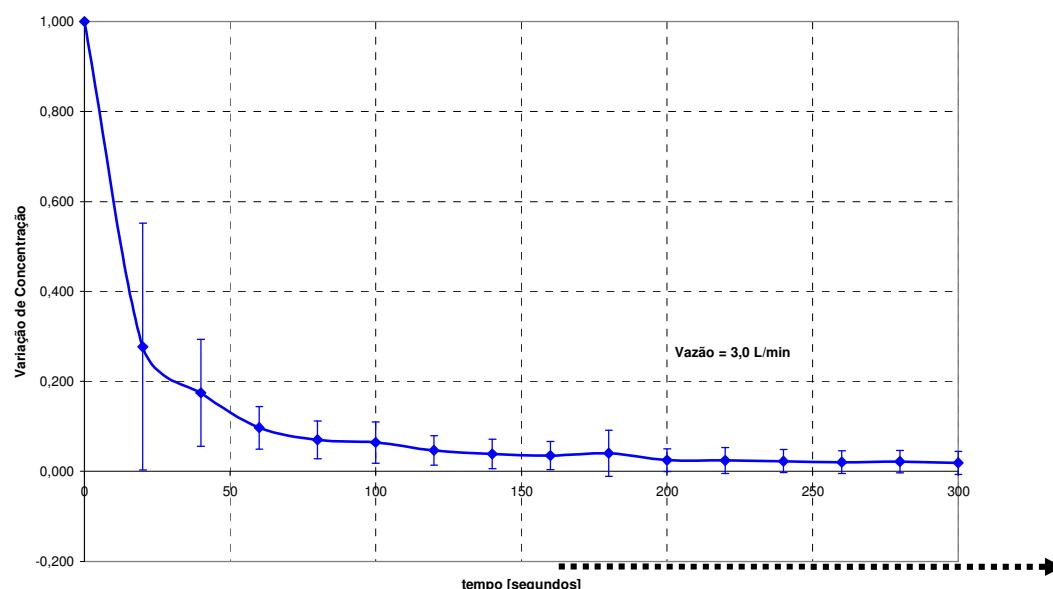
Considerando-se o fato de que não se dispunha de informações prévias sobre qual era o comprimento de onda no qual se verificava a maior absorção da radiação ultravioleta para o produto utilizado nos testes (solução de leite

em pó), optou-se por proceder ao levantamento experimental desse comprimento de onda. Este procedimento consistiu na determinação da curva de absorbância em função da concentração de resíduos de leite na solução de NaOH. Com base nesta solução de NaOH foram preparadas amostras de solução de NaOH com resíduos de leite em pó nas seguintes composições: 5 ppm, 10 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm e 100 ppm. Tomando-se por base a solução de NaOH com 100 ppm de resíduos de leite em pó, foi feita a análise da variação do índice de absorbância em função do comprimento de onda da radiação UV.

Uma vez obtida a curva de calibração no espectrofotômetro UV, procederam-se aos ensaios de limpeza dos resíduos de leite aderidos à parede do tubo de teste. Os ensaios de limpeza consistiram em fazer escoar a solução detergente por um intervalo de tempo igual a 5 minutos, com velocidade variável e compreendida entre 0,16 m/s e 0,19 m/s. As amostras da solução efluente do tubo de testes foram recolhidas com intervalo de tempo entre as coletas de amostras de 10 segundos.

#### 4 Resultados obtidos nos testes experimentais

Os dados experimentais obtidos foram normalizados, obtendo-se uma variação padronizada da concentração de leite residual presente na solução detergente de NaOH, como se mostra no gráfico da Figura 8. Os dados ilustram o comportamento temporal das concentrações de leite presentes na solução detergente de NaOH efluente da seção de testes estudada para a vazão de 3,0 L/min. No gráfico apresenta-se o intervalo de variação do desvio-padrão para os dados experimentais coletados durante os ensaios.



**FIGURA 8** - Evolução temporal da concentração normalizada de leite residual na solução de NaOH efluente da seção de testes para a vazão de 3,0 L/min

A equação (1) representa a cinética que modela matematicamente o comportamento da concentração normalizada de leite residual na solução efluente da seção de testes para a vazão de 3,0 L/min. Nesta equação,  $y$  representa a variável variação da relação entre a concentração final e a inicial presente no sanitizante e  $t$  o tempo transcorrido, expresso em segundos..

$$y = 0,97364 \times e^{\left(\frac{t}{14,45006}\right)} + 0,02635 \times e^{\left(\frac{t}{182,0334}\right)} \quad (1)$$

## 5 A proposta de algoritmo para gerenciamento do sistema de limpeza CIP

A evolução dos sistemas de automação de processos industriais aponta para o emprego de sistemas de medição em tempo real, avaliados a partir de equações matemáticas que representam de forma adequada e coerente o comportamento do processo. (GEDRAITE, 2005)

É importante ressaltar o fato de que esses sistemas de medição em tempo real avaliados com base em equações matemáticas são denominados **sensores virtuais** e representam a tendência atual na área de automação de processos industriais, gerando melhorias de desempenho tais como redução de variabilidade e redução de erro de regime.

Os resultados obtidos neste trabalho permitem que seja implantado um algoritmo de supervisão de operação como o que se mostra no diagrama de blocos da Figura 9.

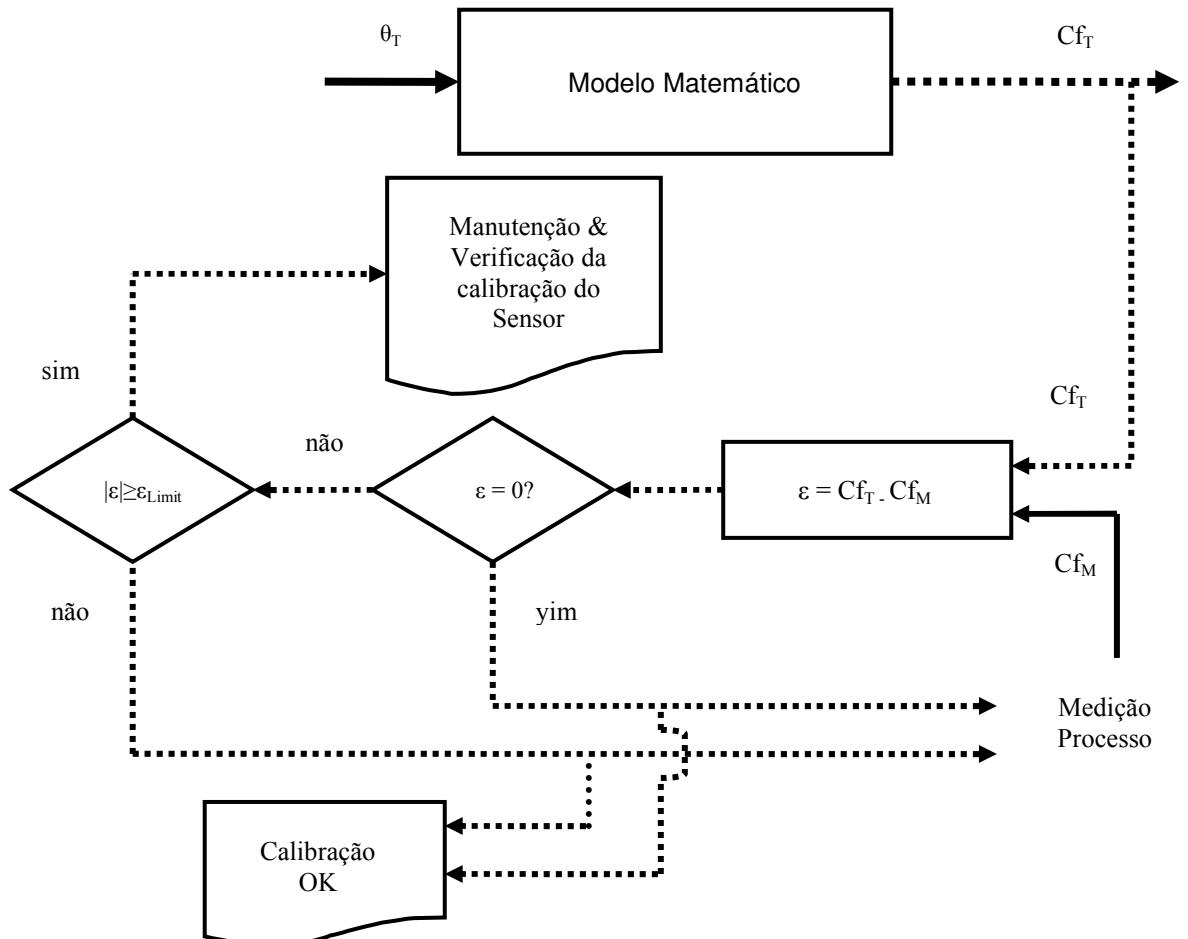
Este algoritmo atuará como um sensor virtual do índice de limpeza do equipamento, permitindo a comparação do valor efetivamente medido de condutividade com aquele previsto pelo modelo matemático apresentado na equação (1).

A proposta desse algoritmo é a de que os operadores de processo definam o **tempo estimado de limpeza tido como alvo ( $\theta_T$ )** para que o modelo matemático **estime a evolução do comportamento da concentração-alvo de resíduos ( $Cf_T$ )** a ser atingida.

O sensor usado na operação real, geralmente baseado na condutividade elétrica, mede a **concentração real de resíduos ( $Cf_M$ )**.

O algoritmo proposto neste trabalho permite, então, comparar-se a condutividade estimada a cada instante com o valor efetivamente medido.

Se a diferença for desprezível, o sensor estará calibrado e, portanto, confiável. Caso contrário, o operador percebe a diferença e pode informar ao pessoal da manutenção que aquele instrumento deve ser verificado.



**FIGURA 9** – Diagrama de Blocos que representa o algoritmo computacional proposto neste trabalho

## 6 Discussão dos Resultados e Conclusão

O gráfico da Figura 8 indica que as incertezas presentes nos ensaios experimentais apresentaram maior influência no início do processo de limpeza. Uma possível razão para esse comportamento pode ser o fato de que a taxa de amostragem não foi adequada para a etapa inicial do processo. Adicionalmente, o controle do valor da vazão foi feito em malha aberta, implicando eventuais flutuações momentâneas delas.

Deve ser ressaltado o fato de que o início da curva apresenta um declive acentuado e, portanto, qualquer variação no tempo de tomada da amostra pode resultar em significativas alterações no valor da concentração de

resíduos medida, haja vista a cinética estudada sugerir uma decaída exponencial.

Com base nos resultados obtidos nos ensaios, considera-se que o processo estudado tem a sua cinética representada por um sistema de primeira ordem, cuja constante de tempo é de aproximadamente 17,2 s.

Os resultados obtidos apontam para a possibilidade de utilização do modelo matemático obtido na otimização do processo de limpeza CIP, por ser este facilmente implantável em sistemas digitais de controle, do tipo PLC ou mesmo em controladores do tipo *single loop*.

## **7 Referências Bibliográficas**

CHEN, X. D., ÖZKAN, N., QIN, F., XIN, H. & LIN, L. **An Effective CIP Procedure for Removing Dairy Protein Based Deposit – A Laboratory Investigation.** In: 2003 ECI Conference on Heat Exchanger Fouling and Cleaning: Fundamentals and Applications – Copyright 2004. Paper 44. 07p

GEDRAITE, R. **Desenvolvimento e implementação de algoritmo computacional para calcular o valor da propriedade difusividade térmica em alimentos aquecidos pelo mecanismo da condução**, São Paulo, SP: USP, 2005. Doutorado.

GORMEZANO, L. **Desenvolvimento e implementação de sistema para avaliar a cinética de remoção de resíduos presentes nos tubos de trocador de calor feixe tubular**, São Paulo, SP: IMT, 2007. Mestrado.