

UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E NATURAIS
CURSO DE CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO
(Bacharelado)

**PROTÓTIPO PARA INTERPOLAÇÃO DE DADOS
EXPERIMENTAIS DE BIOPROCESSOS UTILIZANDO
*BEZIER***

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO SUBMETIDO À UNIVERSIDADE
REGIONAL DE BLUMENAU PARA A OBTENÇÃO DOS CRÉDITOS NA
DISCIPLINA COM NOME EQUIVALENTE NO CURSO DE CIÊNCIAS DA
COMPUTAÇÃO — BACHARELADO

RAPHAEL HENRIQUE KORB NEOTTI

BLUMENAU, JUNHO/2001.

2001/1-59

PROTÓTIPO PARA INTERPOLAÇÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS DE BIOPROCESSOS UTILIZANDO *BEZIER*

RAPHAEL HENRIQUE KORB NEOTTI

ESTE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO FOI JULGADO ADEQUADO
PARA OBTENÇÃO DOS CRÉDITOS NA DISCIPLINA DE TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO OBRIGATÓRIA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE:

BACHAREL EM CIÊNCIAS DA COMPUTAÇÃO

Prof. Antonio Carlos Tavares — Orientador na FURB

Prof. José Roque Voltolini da Silva — Coordenador do TCC

BANCA EXAMINADORA

Prof. Antonio Carlos Tavares

Prof. Dalton Solano dos Reis

Prof. Paulo César Rodacki Gomes

AGRADECIMENTOS

Ao meu pai, Antonio Neotti, que por destino da vida não pode ver este grande feito em minha vida.

A minha namorada, Elis Regina, pelo grande incentivo e motivação para terminar este trabalho de conclusão.

A minha mãe, Ivone Korb Neotti, e minha irmã, Cynthia, por sempre terem acreditado e me apoiado durante estes anos em que me dediquei à formação profissional.

Ao meu orientador, prof. Antonio Carlos Tavares, por ter dado várias idéias de como fazer e conduzir o trabalho.

A empresa em que trabalho, por ter compreendido a importância deste trabalho para minha formação.

E a Deus, por ter me dado esta oportunidade.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	III
SUMÁRIO.....	IV
LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE TABELAS	VII
RESUMO	VIII
ABSTRACT	IX
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. OBJETIVOS	2
1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO	3
2. BIOPROCESSO	4
2.1. PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS INDUSTRIAIS	4
2.1.1. FATORES RELACIONADOS AO MICRORGANISMO	5
2.1.2. FATORES RELACIONADOS AO MEIO DE FERMENTAÇÃO	5
2.1.3. FATORES RELACIONADOS AOS PARÂMETROS DO BIOPROCESSO	5
2.2. MEIO DE CULTURA.....	6
2.3. CRESCIMENTO CELULAR	6
2.3.1. CURVA DE CRESCIMENTO CELULAR	7
2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE CRESCIMENTO	10
2.5. FORMAS DE CONDUÇÃO DOS PROCESSOS FERMENTATIVOS	11
3. SPLINES	13
3.1. CONCEITO GERAL.....	13
3.2. TIPOS DE <i>SPLINES</i>	13
3.3. ESCOLHA DO MÉTODO	13
3.4. <i>SPLINE</i> DE BEZIER.....	14
3.5. CONCEITOS E FUNDAMENTOS	14
4. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO	19
4.1. PROJETO DO PROTÓTIPO	19
4.2. IMPLEMENTAÇÃO	19
4.2.1. TELA DE ENTRADA	21
4.2.2. INCLUSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	21

4.2.3. PLOTAGEM DO GRÁFICO	23
4.3. OPERACIONALIDADES	26
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÕES	31
5.1. LIMITAÇÕES	31
5.2. EXTENSÕES	31
ANEXO A: ALGORITMO PARA CÁLCULO DOS PONTOS	33
ANEXO B: ALGORITMO PARA PLOTAGEM DOS PONTOS CALCULADOS.....	35
ANEXO C: ALGORITMO DE LEITURA DE ARQUIVO .TCC COM OS PONTOS DE CONTROLES	36
ANEXO D: ALGORITMO DE GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS .TCC E .CAL COM OS PONTOS DE CONTROLES E PONTOS CALCULADOS RESPECTIVAMENTE.....	37
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	39

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 — PRINCIPAIS ETAPAS DE DESENVOLVIMENTO DE UM BIOPROCESSO.....	4
FIGURA 2 — CURVA DE CRESCIMENTO CELULAR.	9
FIGURA 3 — PRINCIPAIS FORMAS DE OPERAÇÃO DE UM PROCESSO.....	11
FIGURA 4 — ESPECIFICAÇÃO DO PROTÓTIPO.....	20
FIGURA 5 — TELA DE ENTRADA.....	21
FIGURA 6 — FLUXOGRAMA DA INCLUSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	21
FIGURA 7 — INCLUSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS	22
FIGURA 8 — FLUXOGRAMA DA PLOTAGEM DO GRÁFICO.....	23
FIGURA 9 — CÁLCULO DOS PONTOS.....	24
FIGURA 10 — PLOTAGEM DO GRÁFICO	25
FIGURA 11 — INCLUSÃO DE PONTOS EXEMPLO	27
FIGURA 12 — EXEMPLO DE PLOTAGEM COM PESO 10.	27
FIGURA 13 — EXEMPLO DE PLOTAGEM COM PESO 1000	28
FIGURA 14 — PLOTAGEM DOS PONTOS NO LISSAGE.....	29
FIGURA 15 — CÁLCULO DO PONTO NO EXCEL.....	29

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 — FASES DA CURVA DO CRESCIMENTO CELULAR.....	8
TABELA 2 — COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS <i>SPLINES</i>	13

RESUMO

Este trabalho apresenta um estudo sobre uma das técnicas para interpolação de dados de pontos no sistema de coordenadas cartesianas, estimando pontos para os quais não se conhece a função original, a técnica de *Bezier*. A fundamentação teórica possibilita o entendimento de onde surgem e para que são usados os dados experimentais além de demonstrar a equação de *Bezier*. Esta pesquisa possibilitou o desenvolvimento de um protótipo de plotagem de pontos de controle e determinar se o método de *Bezier* é o método mais adequado para a plotagem destes tipos de dados. Este documento descreve o processo de implementação da fórmula genérica de *Bezier* que pode ser definida pelo binômio de Newton.

ABSTRACT

This work introduce a study about one technique for interpolation of data in Cartesian system, estimating point for the how can't be an original function the *Bezier's* technique. The theoretical basis let the understanding of where arose and for that the experimental points are to used addiction of show the *Bezier's* equation. This research enable a developing of a prototype's of plotting of control points and determine if *Bezier's* technique is the best for plotting this types of points. This paper describes a process of implementation of generic formula of *Bezier* that can be for Newton binomial the finite.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de meios computacionais para solucionar problemas de diversas áreas é cada vez maior. Isso ocorre porque muitos destes problemas podem ser representados por modelos matemáticos que são definidos por Martins (1999) em sua apresentação de aula, como a caracterização geral de um processo, objeto ou conceito em termos matemáticos, o que permite uma manipulação relativamente simples das variáveis pertinentes ao processo, objeto ou conceito.

As representações das modelagens geométricas, como as interpolações, segundo Cláudio (2000) são muito utilizadas onde é realmente difícil calcular o valor da função ou ainda quando não se conhece a expressão da função, mas se possui um conjunto de valores que em geral são obtidos através de experimentos.

Um dos métodos de interpolação são as *splines* que Cláudio (2000) define como uma interpolação mecânica que pode ser feita manualmente por meio de hastes flexíveis de madeira ou plásticas, colocadas sobre certos pontos de uma mesa de desenho chamados de nós. Apesar de ser usada desde o século passado, só no fim da década de 60 foi desenvolvido o modelo matemático deste problema.

Com as *splines*, pode-se auxiliar na visualização de caminhos a serem tomados e possíveis erros nos processos experimentais realizados. Na área da engenharia, em particular a Engenharia de Bioquímica, a função obtida a partir de dados experimentais, pode ser utilizada para a modelagem de bioprocessos. Através do modelo matemático é possível analisar parâmetros cinéticos de crescimento celular, por exemplo. Ao longo de um experimento de biotecnologia são obtidos dados do crescimento mencionado que, uma vez conhecido o modelo matemático, este permite calcular parâmetros como a quantidade de produto produzido, o substrato consumido pela célula em estudo.

Com a função encontrada pode-se calcular sua derivada e com isto achar parâmetros como a velocidade específica de crescimento que, segundo Freitas (1995) em seu relatório de estágio, diz que o cálculo de velocidades específicas, a partir de dados experimentais, é de grande importância para um bom ajuste de modelos matemáticos, relativos a processos fermentativos. Sua relevância reside fundamentalmente em dois aspectos: na formulação do modelo e na estimativa preliminar de parâmetros.

Cláudio (2000) define ajustes destas curvas como: o ajuste é outra técnica de aproximação de funções que tem características diferentes da interpolação. Em geral se aplica a um conjunto de dados experimentais.

Segundo Scriban (1985) os dados experimentais de um bioprocessos são retirados de uma cultura microbiana do tipo clássica, na qual após a semeadura, prossegue o crescimento até o esgotamento do meio. Este mesmo autor também diz que tradicionalmente, as fermentações industriais¹ são conduzidas com manutenção das variáveis de ação com valores constantes. Seus valores são freqüentemente determinados a partir de critérios biológicos que visam a melhor produtividade com o menor risco de contaminação, por exemplo. O mesmo autor continua escrevendo que, evidentemente é desejável fazê-las variar no tempo, com o fim de melhorar os resultados. É isso que permite a execução de técnicas de otimização. Completando o raciocínio, este autor diz que uma fermentação, como toda operação industrial, é submetida à noção de índice de performance, em que entram, particularmente, o tempo de operação, a produção, o consumo de energia, de matéria-prima e o rendimento.

Em vista desta grande utilidade que facilitará o estudo dos bioprocessos e a modelagem matemática dos mesmos, este trabalho terá relevância no sentido de que os resultados terão uma margem de erro menor e uma velocidade de obtenção das informações maior. No lado da computação, pode-se dizer que a função *spline* é utilizada para realizar a modelagem geométrica de quaisquer valores de dados experimentais independentemente da área, ou seja, os dados experimentais que serão utilizados serão referentes a bioprocessos, entretanto, nada impede que sejam utilizados dados de áreas diferentes.

1.1. OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo principal à aplicação prática da interpolação usando *splines*.

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a. Manipulação computacional de um só polinômio de *spline*;

¹ Fermentação pode ser definida como um processo biológico onde microrganismos, em presença de um substrato específico, produzem um determinado produto de interesse industrial.

- b. Tratamento de dados de bioprocesso para obtenção do modelo matemático;
- c. Possibilitar a utilização de dados experimentais reais para a geração da curva de crescimento microbiano (X), consumo de substrato (S) e formação de produto (P);
- d. Determinar, a partir dos dados experimentais, a velocidade específica de crescimento celular, de um bioprocesso.

1.2. ORGANIZAÇÃO DO TEXTO

Este trabalho de conclusão de curso está organizado de forma a permitir maior entendimento sobre o assunto proposto, da seguinte maneira:

Capítulo 2 – Bioprocessos – fornece a origem dos dados experimentais e para que eles são utilizados na engenharia, dando uma visão geral quando se refere aos dados a serem plotados;

Capítulo 3 – *Splines* – define o método que foi escolhido, *bezier*, e a maneira que foi escolhido. Demonstra também como é encontrada a equação genérica do binômio de Newton;

Capítulo 4 – Projeto e implementação do protótipo - explica como se desenvolveram a especificação e implementação do protótipo.

Capítulo 5 – Conclusão – mostra o resultado do trabalho e suas limitações e possíveis melhoramentos.

2. BIOPROCESSO

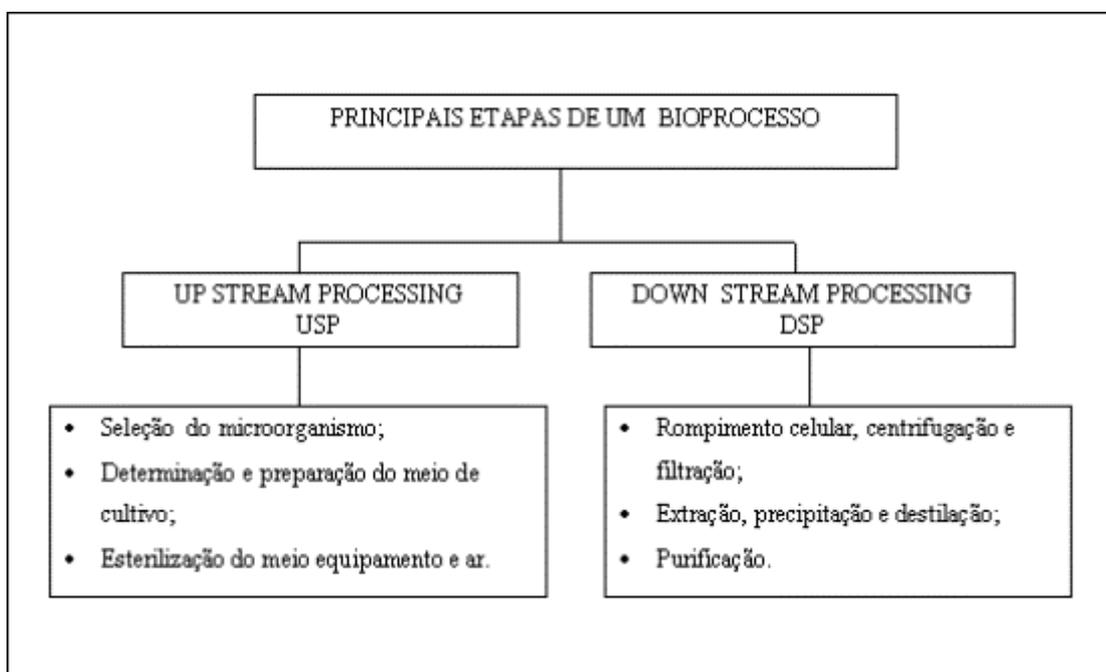
Este capítulo descreve de forma sucinta quais os aspectos que devem ser observados nos processos biotecnológicos.

Importante para o entendimento de um processo biotecnológico é o crescimento celular, meio de cultura e a curva de crescimento que são fatores que influenciam na velocidade de crescimento.

2.1. PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS INDUSTRIAIS

Segundo Bailey (1995) para o desenvolvimento de processos biotecnológicos (fermentativos), diversos aspectos e etapas devem ser observados, principalmente relativos à etapa de seleção do microorganismo promissor e produtor do produto desejado, estabelecimento de condições ótimas de fermentação e técnicas relacionadas à separação e purificação do produto de interesse. Na Figura 1 estão relacionadas as principais etapas do desenvolvimento de um bioprocessamento, no *USP* ocorre a formação do produto desejado e no *DSP* ocorre a separação do produto do meio fermentativo.

Figura 1— Principais etapas de desenvolvimento de um bioprocessamento.



Para o desenvolvimento de um processo fermentativo visando a produção de um produto em escala industrial, deve-se observar aspectos relacionados ao microrganismo, ao meio de fermentação e aos parâmetros envolvidos neste bioprocessamento.

2.1.1. FATORES RELACIONADOS AO MICRORGANISMO

Entre os diversos fatores relacionados ao microrganismo biocatalizador de um processo pode-se citar (Bailey, 1995):

- Não deve ser patogênico;
- Apresentar crescimento rápido;
- Produzir quantidades apreciáveis do produto desejado.

2.1.2. FATORES RELACIONADOS AO MEIO DE FERMENTAÇÃO

Quanto ao meio de fermentação, ou seja, o meio de cultivo onde o microrganismo deverá crescer tem-se (Bailey, 1995):

- Ser de custo baixo;
- Ser acessível;
- Possuir composição química simples.

2.1.3. FATORES RELACIONADOS AOS PARÂMETROS DO BIOPROCESSO

Na condução do bioprocessamento diversas características e variáveis são monitoradas ao longo do processo, tais como (Bailey, 1995):

- Temperatura;
- Ph;
- Agitação / aeração;
- Presença de inibidores no meio, que se refere a qualquer componente que limita o processo fermentativo;

- Configuração dos bioreatores, que são equipamentos onde ocorrem reações bioquímicas na presença de células vivas (biocatalizadores);
- Forma de condução do processo.

2.2. MEIO DE CULTURA

Borzani (1975) comenta que nas condições de laboratório, o crescimento de microorganismos é conseguido semeando-os em meios de cultura, cuja composição deve atender aos princípios de nutrição como fontes de energia, fontes de material plástico, água e oxigênio atmosférico, fornecendo-lhes todos os elementos de que necessitam. Dada a variedade de espécies microbianas (tipos de nutritivos), é fácil compreender que não existe meio de cultura universal. Assim, para compor um meio de crescimento adequado, é necessário conhecer a fisiologia do microorganismo em estudo.

Portanto, o microorganismo poderá crescer em um dos seguintes meios de cultura: meio sintético ou meio complexo. Chama-se meio sintético aquele cuja composição química é qualitativa e quantitativamente bem conhecida. Se for cultivado microorganismo mais exigente nesse meio, pode-se enriquecê-lo com substâncias capazes de fornecer uma variedade grande de vitaminas e aminoácidos como, por exemplo, extrato de leveduras. Nesse momento, o meio passou a ser complexo, pois contém, agora, um produto cuja composição química não é perfeitamente definida, o extrato de leveduras. Na prática, a maior parte dos meios utilizados para um bioprocessamento é do tipo complexo e as mais variadas substâncias podem ser utilizadas na sua composição: peptonas, extrato de carne, extrato de órgão animais, extrato de vegetais, sangue, soro, etc.

2.3. CRESCIMENTO CELULAR

Os microorganismos são cultivados em meios que contém nutriente, que proporcionam o bom crescimento destes. Os microorganismos apresentam grandes diferenças requeridas para o crescimento. Algumas espécies crescem em temperaturas próximas a ponto de congelamento da água; outras crescem em temperaturas tão altas quanto 110 °C.

A temperatura tem uma grande influência no crescimento dos microorganismos, tendo uma faixa de variação para cada tipo. Em temperaturas mais favoráveis para o crescimento, o número de divisões celulares por hora, chamado de taxa de crescimento, geralmente dobra

para cada aumento de temperatura de 10° C. E é essa temperatura (onde o microrganismo cresce mais rápido) que é chamada de temperatura ótima de crescimento. De acordo com a temperatura de crescimento os microrganismos podem ser classificados em psicrófilos (crescem com temperatura abaixo de 20°C), mesófilos (crescem com temperatura entre 20°C a 45°C) e termófilos (crescem com temperatura acima de 45°C).

Ao contrário da temperatura ótima, o pH ótimo para o crescimento microbiano encontra-se no valor mediano da variação de pH sobre a qual o crescimento acontecerá. O pH ótimo é, normalmente, bem definido para cada espécie.

Quando os microrganismos são semeados em um meio de cultura apropriado e incubados em condições ótimas para o crescimento, um grande aumento no número de células ocorre em um período de tempo relativamente curto. Em algumas espécies bacterianas, a população máxima é atingida em 24 horas, mas a maioria das outras espécies de microrganismos requer um período de incubação maior para atingir o crescimento máximo. O crescimento em uma cultura microbiana normalmente significa um aumento no número total de células devido à reprodução de microrganismos individuais na cultura (Microbiologia Básica, [200-?]).

Borzani (1975) considera como crescimento, em sistemas biológicos, o aumento de massa resultante de um acréscimo ordenado de todos os componentes do protoplasma. Assim, aumentos de tamanho decorrentes de fenômenos como absorção de água ou acúmulo de material de reserva não pode ser considerado como crescimento. Em microbiologia, embora seja possível estudar o crescimento individual, geralmente o que se mede é o crescimento de uma população, exprimindo-o quer em termos de massa total, quer em função do número de indivíduos.

2.3.1. CURVA DE CRESCIMENTO CELULAR

O crescimento em uma cultura microbiana, significa um crescimento no número total de células, devido à reprodução dos organismos individuais na cultura.

O intervalo de tempo requerido para que cada microrganismo se divida é conhecido como tempo de geração, o qual é fortemente influenciado não somente pela composição nutricional do meio mais também pelas condições físicas de incubação (Microbiologia Básica, [200-?]).

Ward (1991) separa o crescimento em quatro fases. Depois de semear os microrganismos, existe uma fase de latência, também chamada de *lag*, que é a fase em que o organismo está se condicionando ao meio. Após um certo período de tempo a velocidade de crescimento das células aumenta gradualmente, as células crescem em uma velocidade constante e máxima. Esta fase é denominada de exponencial ou logarítmica. À medida que o crescimento continua, os nutrientes vão se esgotando e os produtos vão sendo produzidos pelos organismos, a velocidade de crescimento diminui e finalmente estaciona-se, devido frequentemente ao esgotamento de um nutriente essencial ou ao acúmulo de algum produto tóxico; esta fase é conhecida por estacionária.

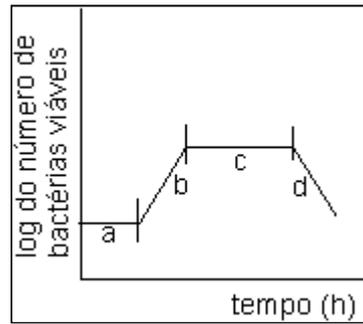
Para Borzani (1975) ainda existe a fase de declínio que é quando a quantidade de seres que morrem se torna progressivamente superior ao número dos seres que surgem.

Na Tabela 1 descreve-se de forma resumida as fases do crescimento celular, visualizado na Figura 2.

Tabela 1 — Fases da curva do crescimento celular.

Fase de crescimento	Taxa de crescimento	Características
a) Lag	Zero	Nenhum aumento no número de células. São sintetizadas novas enzimas para as células se adaptarem ao novo meio.
b) Exponencial	Máxima ou constante	Pico da atividade e eficiência fisiológica.
c) Estacionária	Zero	Acúmulo de produtos metabólicos tóxicos e/ou exaustão de nutrientes. Algumas células morrem, outras crescem e se dividem.
d) Declínio	Negativa	Acúmulo adicional de produtos metabólicos inibitórios. A taxa de morte é acelerada; o número de células diminui de modo exponencial. Tipicamente todas as células morrem em dias ou meses.

Figura 2 — Curva de Crescimento Celular.



Ward (1991) diz que o crescimento se mede em função do incremento da massa celular segundo a equação:

$$\frac{dx}{dt} = \mu x - \alpha x \quad (1)$$

Onde

- x = concentração celular (mg/cm^{-3});
- t = tempo de incubação (h);
- μ = velocidade de crescimento específico (h^{-1});
- α = velocidade específica de metabolismo (h^{-1}).

Quando os nutrientes e outras condições celulares são favoráveis $\mu > \alpha x$ a equação (1) se transforma em:

$$\frac{1}{x} \times \frac{dx}{dt} = \mu x \quad (2)$$

Que integrada, da:

$$x_t = x_0 e^{\mu t} \quad (3)$$

Onde

- x_0 = concentração celular no instante inicial;
- x_t = concentração celular depois de um intervalo de tempo t (h).

2.4. FATORES QUE INFLUENCIAM A VELOCIDADE DE CRESCIMENTO

Ward (1991) diz que a velocidade de crescimento varia com o tipo de célula microbiana e, também, em função das condições físicas e químicas do meio. Em geral, o tempo para que se duplique a biomassa aumenta com a complexidade do organismo, de forma que os tempos de duplicação médios para as células animais e vegetais são substancialmente maiores que os tempos para os fungos filamentosos (mofos) e as leveduras (microrganismos da cerveja, pão, vinho), que por sua vez são maiores para as bactérias.

Entre os vários fatores ambientes que afetam a fermentação segundo Fermentação Alcoólica ([200-?]) pode-se citar:

- Temperatura - variável de acordo com o tipo e finalidade do processo. Assim, o ótimo para a produção de álcool, aguardente, vinho e outros produtos situa-se entre 26°C e 32°C, ao passo que, para a cerveja, está entre 6°C a 20°C;
- pH - variável entre 4,0 e 4,5 para a produção de álcool e entre 4,0 e 6,0 para a cerveja. O pH baixo inibe o desenvolvimento de bactérias contaminantes, sem prejudicar o desenvolvimento das leveduras;
- Concentração da matéria-prima - a levedura suporta concentrações de açúcar em torno de 22% a 24%. Nos processos industriais ela é variável de acordo com a finalidade do processo: situa-se entre 12%-14% no melaço, para a produção de álcool, entre 6%-9% para a produção de cerveja e entre 22%-24% no suco de uva para obtenção de vinho;
- Elementos minerais - certos tipos de matéria prima requerem a adição de substâncias minerais para suprir as necessidades da levedura em certos elementos principalmente P e K (geralmente adicionados sob a forma de (K_2HPO_4)).

2.5. FORMAS DE CONDUÇÃO DOS PROCESSOS FERMENTATIVOS

Entre as diferentes formas utilizadas na condução de um processo fermentativo, podem-se destacar: (Fermentação alcoólica [200-?]).

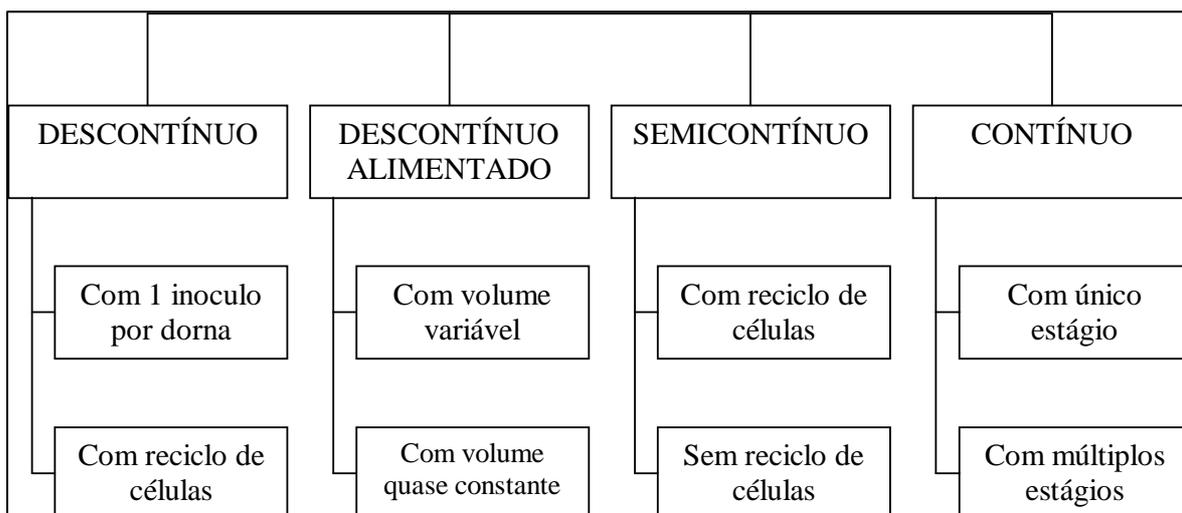
Sistema Descontínuo Simples (batelada): inicia-se a fermentação adicionando-se um volume v_0 de células em um biorreator, completando-o com o meio de alimentação. Não há retirada do meio fermentado. O processo termina quando a maior parte do substrato for consumida.

Sistema Descontínuo Alimentado: inicia-se colocando um volume de células no reator. Em diferentes intervalos de tempo, adiciona-se um volume de meio de alimentação que poderá ser constante ou variável.

Sistema Contínuo: inicia-se da mesma forma que o descontínuo simples. A partir de um dado instante inicia-se o contínuo propriamente dito. A alimentação de meio e a retirada do meio fermentado é feita a uma dada vazão de modo a manter-se constante o volume do reator e criar, assim, um estado estacionário.

Na Figura 3 visualiza-se de forma resumida as formas de condução de um bioprocessos.

Figura 3 — Principais formas de operação de um processo.



A escolha de uma determinada forma de operação depende de vários fatores entre estes, do tipo de células a serem cultivadas, do meio fermentativo, do tipo de biorreator, do produto a ser obtido além de variáveis técnicas e operacionais (Bailey, 1995).

3. SPLINES

3.1. CONCEITO GERAL

Mortenson (1985) define o conceito geral de *splines* como utilizadores de curvas paramétricas que constituem o meio mais utilizado para a representação de objetos em modelagem geométrica. Foley (1990) complementa dizendo que superfícies bicúbicas são formas mais frequentemente utilizadas, devido ao fato de que superfícies de menor grau apresentam pouca flexibilidade sobre os controles indesejáveis, além de requisitarem maior esforço computacional.

3.2. TIPOS DE SPLINES

Segundo Barsky (1988) e Thalmann (1985) existem diferentes tipos de algoritmos de *splines*, os mais usados são de *Bezier*, *Casteljau*, *B-Spline*, *Hermite*, *Spline*, *Beta-Spline* e *Catmull*.

3.3. ESCOLHA DO MÉTODO

A escolha do método de *splines* a ser usado é complexa e depende de vários parâmetros.

Zoz (1999) em seu trabalho de conclusão de curso determinou comparativos entre os três principais métodos (*Bezier*, *Casteljau* e *B-Spline*), avaliando a ordem de complexidade, necessidade de memória, fator de precisão, aspecto visual e facilidade de implementação.

Os resultados obtidos podem ser visualizados na Tabela 2. Esta descreve os parâmetros analisados para os três métodos e os resultados.

Tabela 2 — Comparação dos métodos *Splines*.

Parâmetro	<i>Bezier</i>	<i>Casteljau</i>	<i>B-Spline</i>
Complexidade	Pior	Melhor	Média
Necessidade de memória	Melhor	Pior	Médio
Fator de precisão	Igual	Igual	Igual
Aspecto visual	Igual	Igual	Igual
Facilidade de implementação	Média	Melhor	Pior

A escolha do método a ser utilizado neste trabalho baseou-se nas conclusões de Zoz (1999) conforme descrito abaixo.

O fator de precisão que poderia ser o parâmetro de principal influência apresentou os mesmos resultados para todos os métodos avaliados. O aspecto visual que seria o segundo parâmetro de maior influência na seleção do método a ser escolhido, pois análises futuras na visualização gráfica do experimento serão feitas por técnicos de outras áreas, apresentou curvas exatamente iguais.

Primeiramente optou-se pelo método de *Casteljau* por ser menos complexo e ter melhor facilidade de implementação, mas no decorrer da especificação, notou-se que este método agrupa os pontos de quatro em quatro, o qual não poderá ser utilizado. Por isso *Bezier* foi escolhido.

3.4. SPLINE DE BEZIER

Segundo Bartels (1987): “Esta palavra teve origem através do nome *Bernstein Bezier*, o qual inventou este algoritmo. *Bezier* é no momento um dos algoritmos mais utilizados na área de *splines*. Caracteriza-se através de pesos estipulados dependendo do número de pontos a serem usados na curva”.

Bartels (1987) continua dizendo que curvas (*spline*) e superfícies *Bernstein Bezier*, ou melhor, curvas e superfícies *Bezier* constituem uma das primeiras tentativas de desenvolver uma interface para CAD mais flexiva e intuitiva. Esta técnica foi usada por alguns anos pela Renault no desenho da parte externa e de painéis externos de automóveis.

3.5. CONCEITOS E FUNDAMENTOS

Foley (1990) diz que a técnica *Bezier* especifica dois pontos, inicial, final e outros dois pontos intermediários. Os pontos inicial e final são determinados por vetores P_1P_2 e P_3P_4 . A função interpola os pontos inicial e final e aproxima os outros dois.

A curva *Bezier* $p(t)$, é baseada em $(n + 1)$ pontos de controle p_0, p_1, \dots, p_n , e é representada pelo polinômio:

$$p(u) = \sum_{i=0}^n p_i B_{i,n}(u) , \quad u \in [0, 1] \quad (4)$$

Esta equação é conhecida como Bernstein Polinomial para Hill (1990), Mortenson (1985), e para Foley (1990), e como uma função combinatória para Newman (1991), onde a função $B_{i,n}(u)$ é definida como:

$$B_{i,n}(u) = C(n,i)u^i(1-u)^{n-i} \quad (5)$$

Onde $C(n,i)$ é a função coeficiente binomial para $C(n,i) = \frac{n!}{i!(n-i)!}$, explica Mortenson (1985).

Persiano (1989) explana que as funções peso $F(i)$ empregadas por *Bezier* são exatamente os termos da fatora  o binomial de $(a+b)^n$ quando $a = 1 - u$ e $b = u$, também conhecidas por fun  o de Bernstein.

Oliveira (1980) demonstra a análise combinatória que    aplicada no desenvolvimento da potência de um binômio, conhecido por binômio de Newton, que   :

$$(a+b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} b^i a^{n-i} \quad (6)$$

   imediato que:

$$(a+b)^0 = 1$$

$$(a+b)^1 = a+b$$

$$(a+b)^2 = a^2 + 2ab + b^2$$

$$(a+b)^3 = a^3 + 3a^2b + 3ab^2 + b^3$$

Ou

$$(a+b)^0 = \binom{0}{0} b^0 a^{0-0} = \sum_{i=0}^0 \binom{0}{i} b^i a^{0-i}$$

$$(a+b)^1 = \binom{1}{0} a + \binom{1}{1} b = \sum_{i=0}^1 \binom{1}{i} b^i a^{1-i}$$

$$(a+b)^2 = \binom{2}{0} a^2 + \binom{2}{1} ab + \binom{2}{2} b^2 = \sum_{i=0}^2 \binom{2}{i} b^i a^{2-i}$$

$$(a+b)^3 = \binom{3}{0}a^3 + \binom{3}{1}a^2b + \binom{3}{2}ab^2 + \binom{3}{3}b^3 = \sum_{i=0}^3 \binom{3}{i}b^i a^{3-i}$$

Vê-se que a fórmula é verdadeira para $n = 0, 1, 2$ e 3 .

Supondo que a fórmula seja verdadeira para um expoente $n-1 \in \mathbb{N}$, ou seja:

$$(a+b)^{n-1} = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-1-i} \quad (7)$$

Provando que a mesma fórmula é verdadeira quando o expoente é n . Para isto multiplica-se os dois membros por $a+b$, tendo,

$$(a+b)^n = (a+b) \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-1-i}$$

Aplicando a propriedade distributiva, tem-se:

$$(a+b)^n = a \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-1-i} + b \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-1-i}$$

Ou seja:

$$(a+b)^n = \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-i} + \sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^{i+1} a^{n-1-i} \quad (8)$$

Nota-se que:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-i} = \binom{n-1}{0} a^n + \sum_{i=1}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^i a^{n-i}$$

Substituindo i por j , vem:

$$\binom{n-1}{0} a^n + \sum_{j=1}^{n-1} \binom{n-1}{j} b^j a^{n-j} \quad (9)$$

Por outro lado, se no segundo membro de (8) faz-se $i+1 = j$, então se tem:

$$\text{Para } i=0 \rightarrow j=1$$

$$\text{Para } i=n-1 \rightarrow j=n$$

Então se tem:

$$\sum_{i=0}^{n-1} \binom{n-1}{i} b^{i+1} a^{n-1-i} = \sum_{j=1}^n \binom{n-1}{j-1} b^j a^{n-1-j+1}$$

ou

$$= \sum_{j=1}^n \binom{n-1}{j-1} b^j a^{n-j}$$

ou finalmente:

$$\sum_{j=1}^n \binom{n-1}{j-1} b^j a^{n-j} + \binom{n-1}{n-1} b^n \tag{10}$$

Adicionando-se as expressões (9) e (10), tem-se:

$$(a+b) = \binom{n-1}{0} a^n + \sum_{j=1}^{n-1} \binom{n-1}{j} b^j a^{n-j} + \sum_{j=1}^n \binom{n-1}{j-1} b^j a^{n-j} + \binom{n-1}{n-1} b^n$$

Colocando-se em evidência $b^j a^{n-j}$, vem:

$$(a+b)^n = \binom{n-1}{0} a^n + \sum_{j=1}^{n-1} \left[\binom{n-1}{j} + \binom{n-1}{j-1} \right] b^j a^{n-j} + \binom{n-1}{n-1} b^n$$

Observando-se que:

$$\binom{n-1}{0} = \binom{n}{0} = 1 \quad \binom{n-1}{j} + \binom{n-1}{j-1} = \binom{n}{j} \quad \text{Relação de Stifel} \quad \binom{n-1}{n-1} = \binom{n}{n} = 1$$

Pode-se escrever:

$$(a+b)^n = \binom{n}{0} b^0 a^n + \sum_{j=1}^{n-1} \binom{n}{j} b^j a^{n-j} + \binom{n}{n} b^n a^0$$

ou, por último:

$$(a+b)^n = \sum_{j=0}^n \binom{n}{j} b^j a^{n-j}$$

Fazendo-se $j = i$, tem-se:

$$(a + b)^n = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} b^i a^{n-i}$$

(11)

Comparando-se a equação (11) do binômio de Newton encontrada com a equação (4) genérica de *bezier* citada no início deste item, tem-se uma equação semelhante.

Tendo-se uma equação geral que, a partir desta, pode-se chegar em uma equação específica de n pontos, passou-se para a especificação e implementação do protótipo.

4. PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO PROTÓTIPO

4.1. PROJETO DO PROTÓTIPO

O protótipo do software foi desenvolvido para ser utilizado na modelagem de bioprocessos na engenharia bioquímica, analisando parâmetros cinéticos do crescimento celular.

A função *spline* é utilizada para realizar a modelagem geométrica de valores de dados experimentais. Estes serão usados como os dados de entrada para o algoritmo de *Bezier* implementado no protótipo.

Com a execução do algoritmo, será realizada a plotagem para a visualização do gráfico de velocidade específica dos dados analisados em função do polinômio encontrado. Com a função encontrada será possível realizar ajustes na curva obtida para eliminar erros nos dados amostrados. Estes erros podem ser originados devido à forma da coleta e tratamento de amostragem.

Objetiva-se com este protótipo, permitir uma visualização e estudo dos bioprocessos.

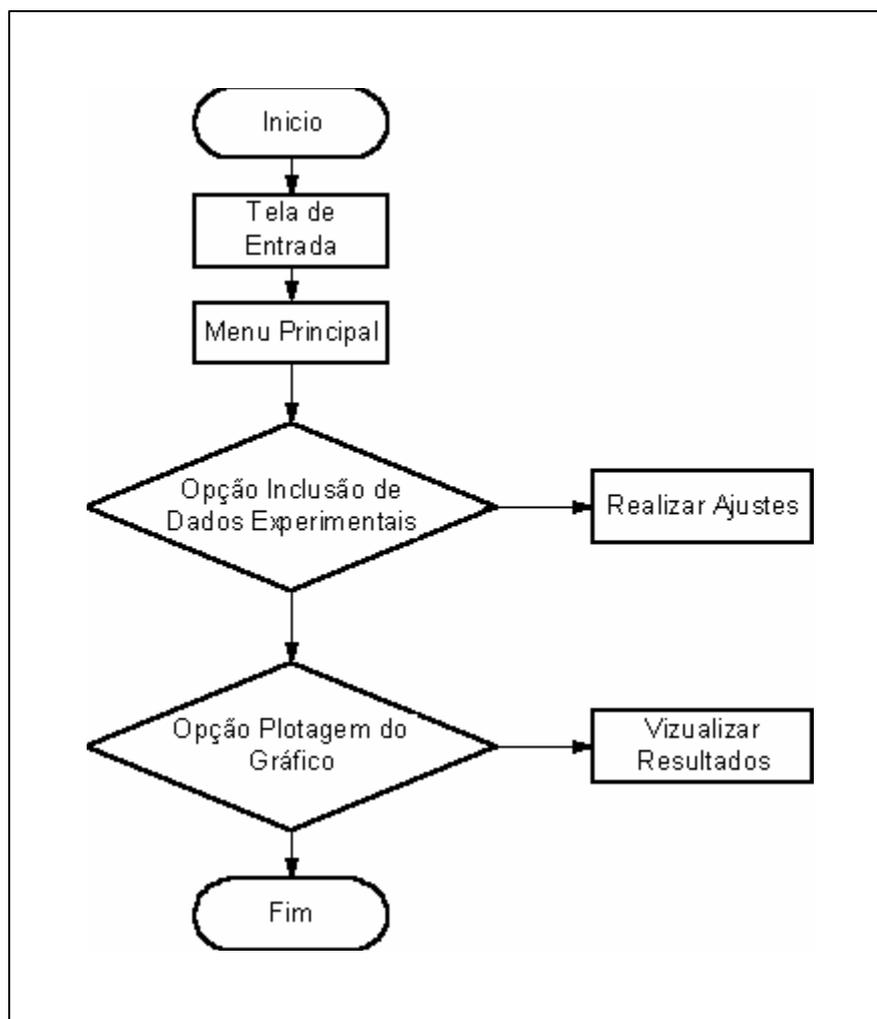
4.2. IMPLEMENTAÇÃO

O algoritmo de *Bezier* implementado é definido pelo desenvolvimento genérico do binômio de Newton. Conforme apresentado no item 3.5.

Foram utilizados fluxogramas como forma de especificar o protótipo.

A especificação do protótipo do software desenvolvido com uma visão geral é descrita através da Figura 4, a seguir.

Figura 4 — Especificação do Protótipo

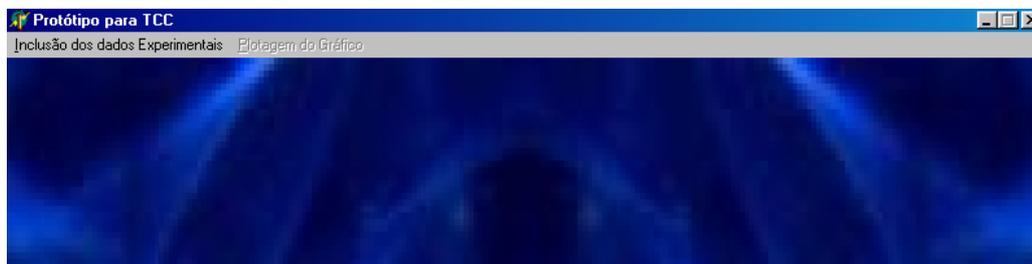


A partir da tela de entrada, que é primeira tela que aparece quando se executa o protótipo, inclui-se os dados experimentais do Bioprocesso no menu / Inclusão de Dados Experimentais. No menu / Plotagem do Gráfico, visualiza-se o gráfico gerado pelos pontos calculados a partir dos pontos de controles, que são os dados amostrados. Com o gráfico desenhado, pode-se voltar a tela de inclusão de dados para ser realizado ajuste na curva. Assim quando novamente entrar na tela de plotagem se terá a visualização dos resultados.

4.2.1. TELA DE ENTRADA

Na figura 5, tem-se acesso as funções de inclusão de dados e plotagem do gráfico, sendo que este último só será habilitado após a inclusão dos dados experimentais.

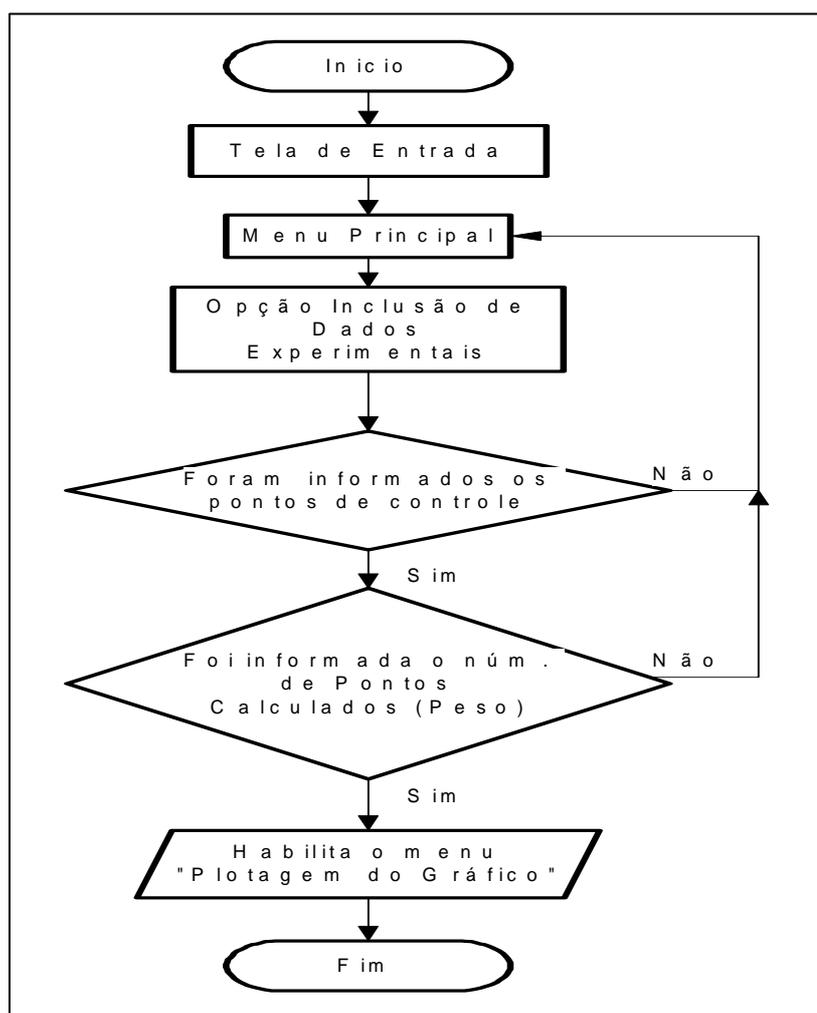
Figura 5 — Tela de Entrada



4.2.2. INCLUSÃO DE DADOS EXPERIMENTAIS

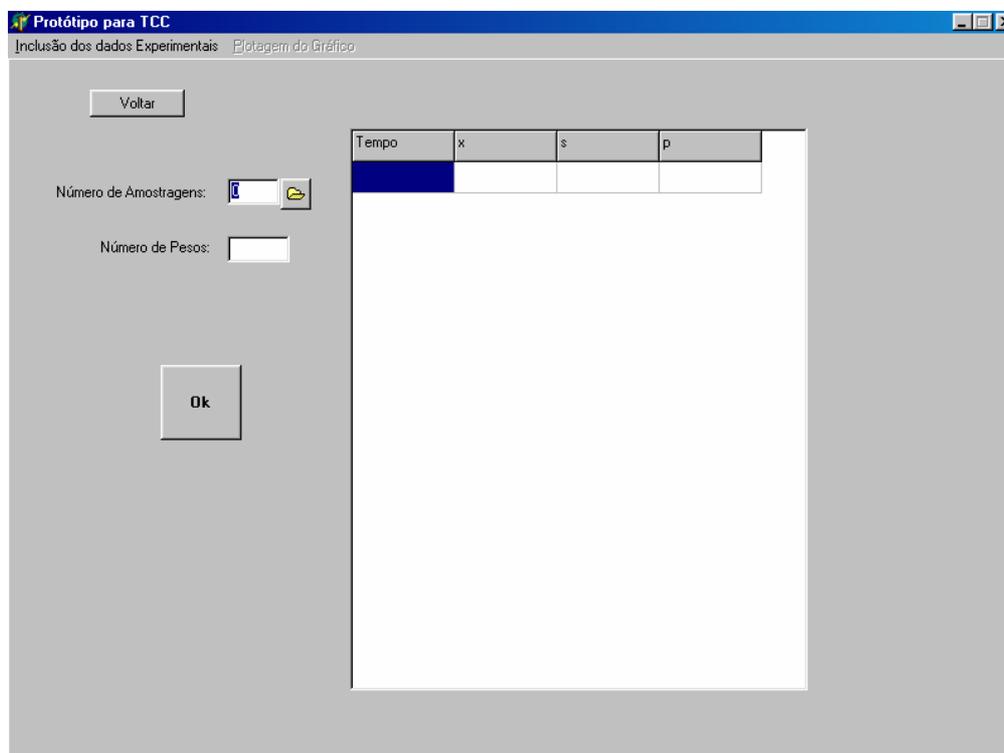
A tela comporta-se de acordo demonstrado na figura 6.

Figura 6 — Fluxograma da Inclusão de Dados Experimentais



O número de pontos amostrados e o número de pontos calculados são informados na tela que pode ser vista na figura 7. Os pontos calculados são definidos no intervalo de $1/(\text{número de peso informado})$.

Figura 7 — Inclusão de Dados Experimentais



Os dados amostrados informados são divididos em tempo, X (concentração celular), S (substrato) e P (produto).

O botão **OK** serve para quando for informado, o número de pontos e o peso habilitar o grid do lado direito, que é um componente próprio do Delphi5.

O botão  serve para abrir arquivos com extensão *.tcc*, que são arquivos de dados experimentais definidos da seguinte forma.

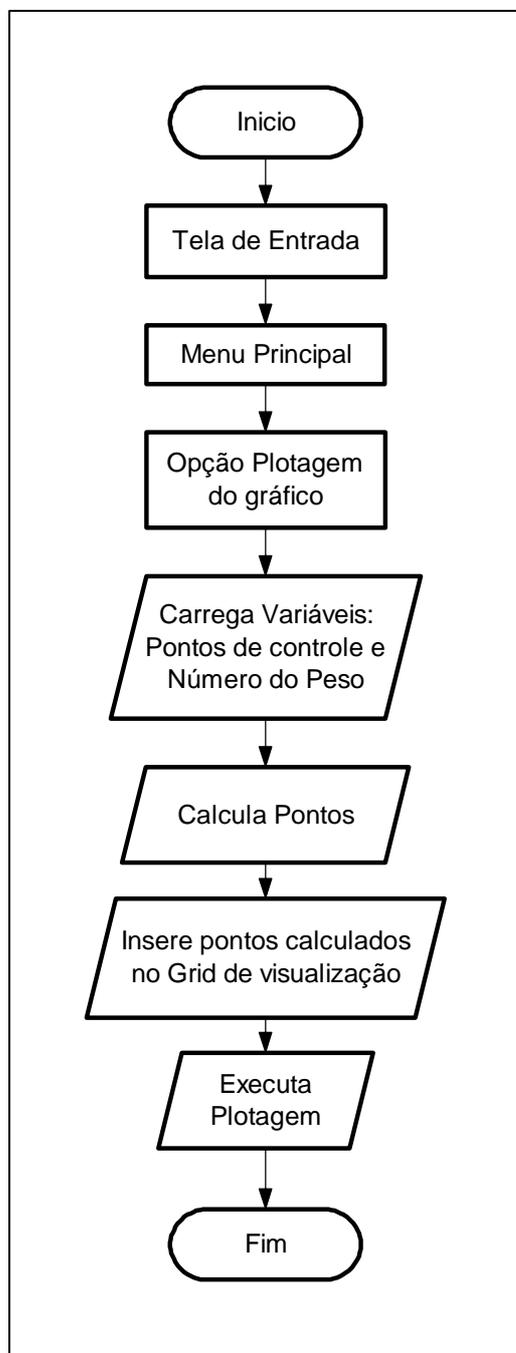
A primeira linha do arquivo refere-se ao número de pontos e ao peso a serem utilizados, respectivamente, separados por ‘;’. As demais linhas contêm os pontos de controle, também separados por ‘;’, na ordem de: Tempo; X; S; P.

A implementação da leitura do arquivo pode ser analisada no anexo C.

4.2.3. PLOTAGEM DO GRÁFICO

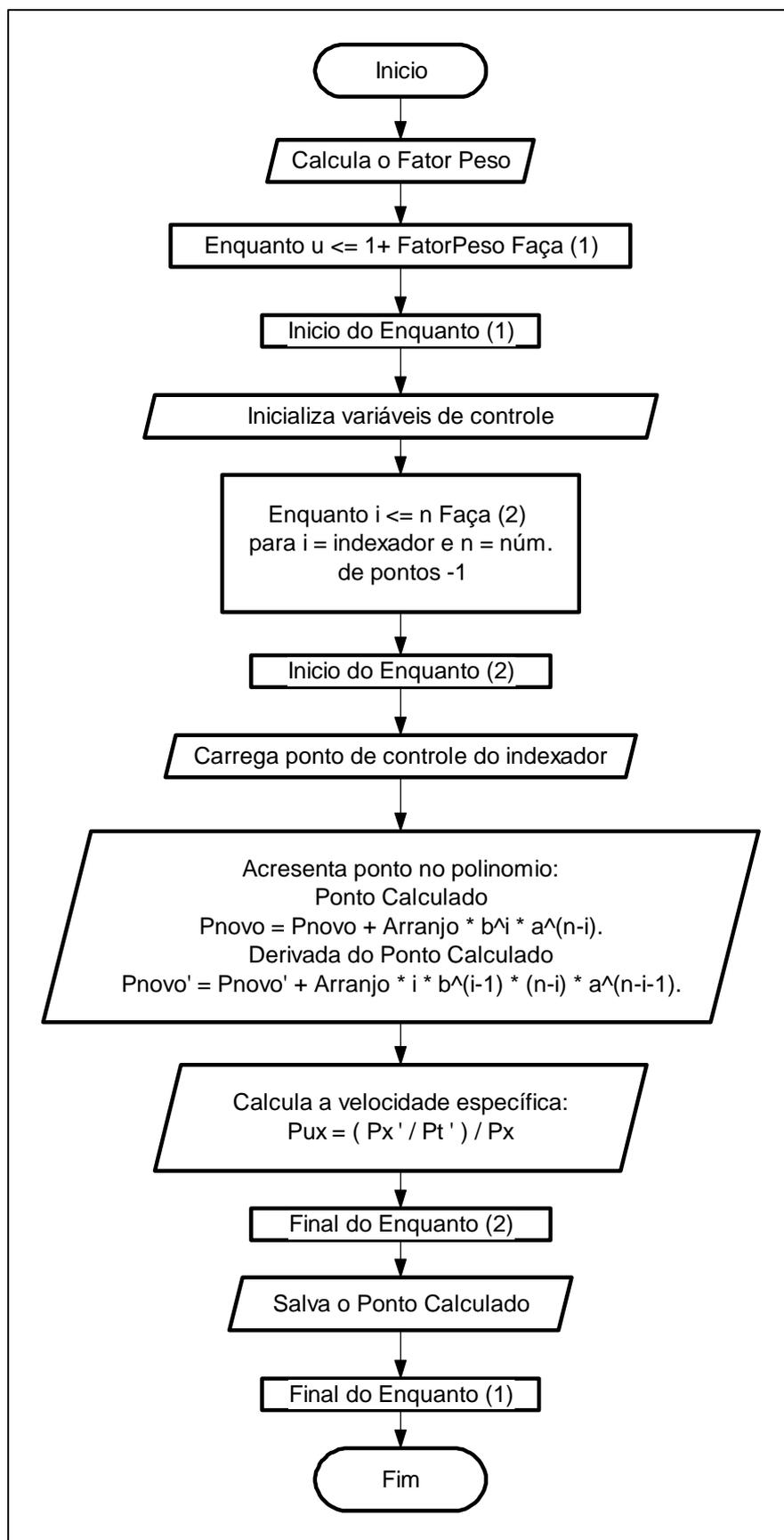
A tela de plotagem do gráfico procede da forma visualizada na figura 8:

Figura 8 — Fluxograma da Plotagem do gráfico.



O cálculo dos pontos está especificado pelo fluxograma mostrado na figura 9 abaixo.

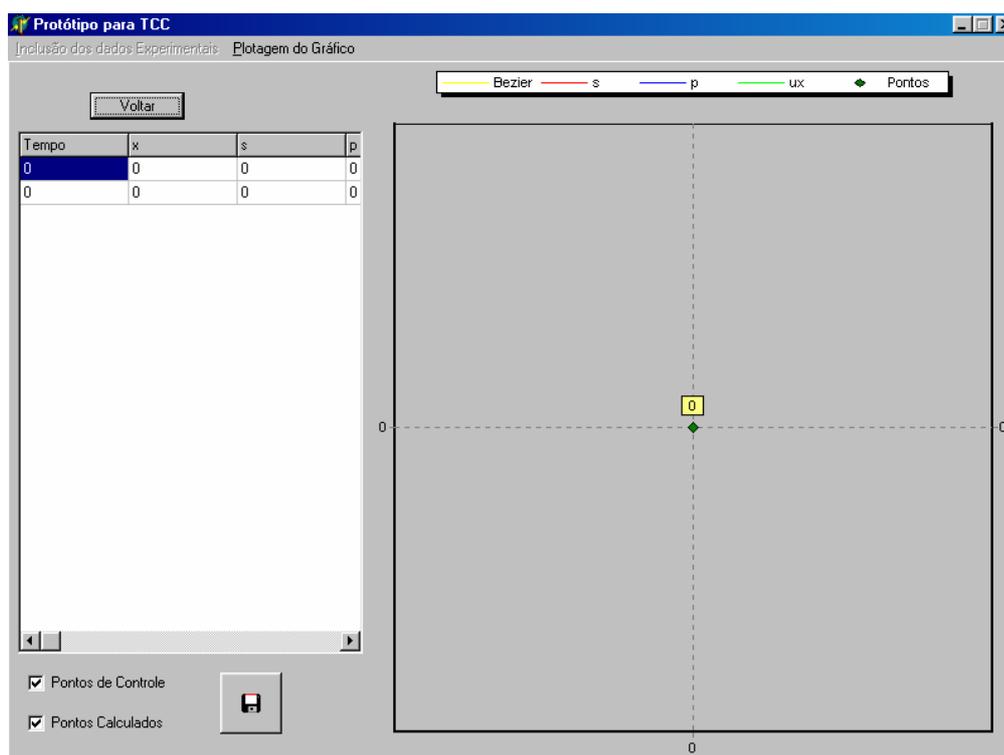
Figura 9 — Cálculo dos Pontos.



A principal função do protótipo é a função de cálculo dos pontos a serem plotados. Esta função tem como base a equação genérica do binômio de Newton e pode ser analisada no anexo A.

Outra função que também tem uma grande importância, é a função que seleciona os pontos calculados e os plota no gráfico, identificado no fluxograma da figura 8 como “Executa Plotagem”, conforme anexo B.

Figura 10 — Plotagem do Gráfico



Na tela demonstrada pela figura 10, pode-se visualizar os gráficos dos pontos calculados quando informados os pontos de controle na seguinte forma:

- Amarelo: gráfico da concentração celular (X);
- Vermelho: gráfico da concentração de substrato (S);
- Azul: gráfico da concentração do produto (P);
- Verde: gráfico da velocidade específica do crescimento da concentração celular;
- Diamantes verde escuro: pontos de controle.

No *grid* que aparece ao lado esquerdo da área de plotagem pode-se analisar os pontos calculados. Neste aparecem o (peso+1) pontos calculados.

A disposição dos gráficos e dos pontos pode ser mais bem vista quando existem pontos informados, como é o caso da figura 12.

Percebe-se também que no gráfico existem dois eixos verticais. O que se situa do lado direito refere-se ao gráfico da velocidade específica (verde). Os demais gráficos utilizam a escala do lado esquerdo.

O botão  serve para salvar os pontos de controle da tela de inclusão de dados e também os pontos calculados na tela de plotagem, isto de acordo com a sinalização dos indicadores (Pontos de Controle / Pontos calculados). O arquivo que contém os pontos de controle tem extensão *.tcc* e o arquivo de pontos calculados têm extensão *.cal*.

A formatação interna do arquivo de pontos de controle é igual à descrita no item 4.2.2. para o arquivo de leitura dos dados experimentais. O arquivo de pontos calculados segue o mesmo raciocínio, tendo somente uma pequena alteração na primeira linha. O número de pontos é igual ao (peso + 2) dos pontos de controle e o peso não sofre nenhuma alteração.

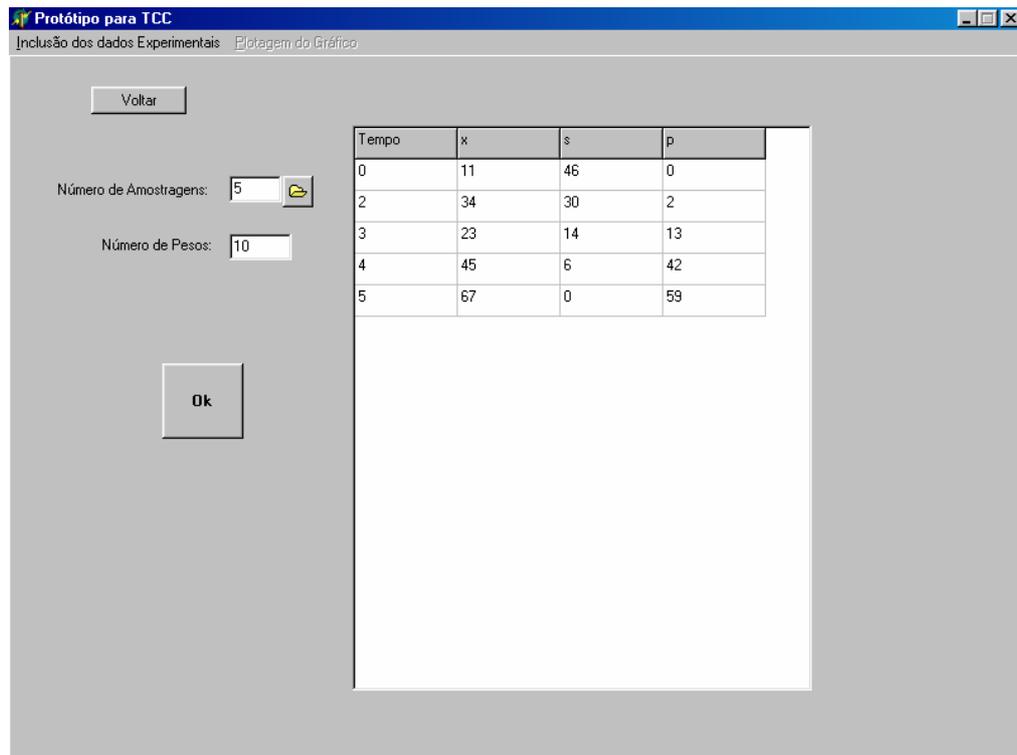
A implementação da gravação dos dados experimentais, pontos de controle e pontos calculados, está descrita no anexo D.

4.3. OPERACIONALIDADES

Tomando como um exemplo os pontos de tempo (0, 2, 3, 4 e 5), x (11, 34, 23, 45 e 67), s (46, 30, 14, 6 e 0) e p (0, 2, 13, 42 e 59), que são informados de acordo com a figura 11 de uma das duas formas possíveis. Ou o usuário informa ponto por ponto na tela, ou abre um arquivo pré-formatado para o protótipo.

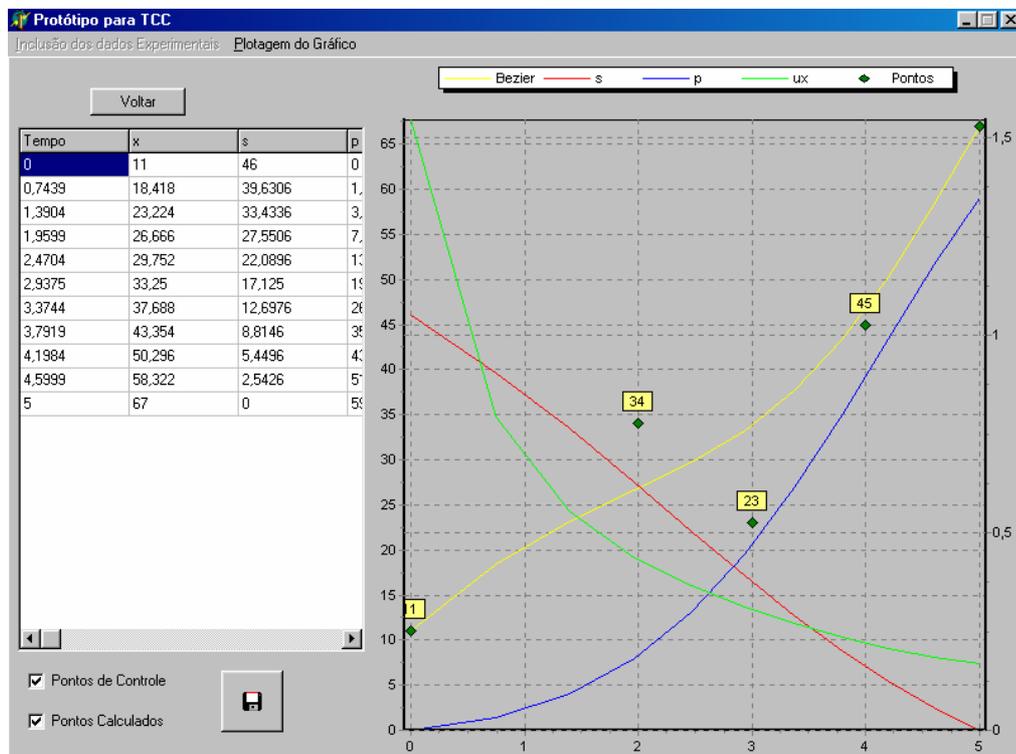
Depois de informados os dados experimentais, estes já geram uma visualização prévia do gráfico a partir da tela de plotagem do gráfico vista na figura 12.

Figura 11 — Inclusão de pontos exemplo



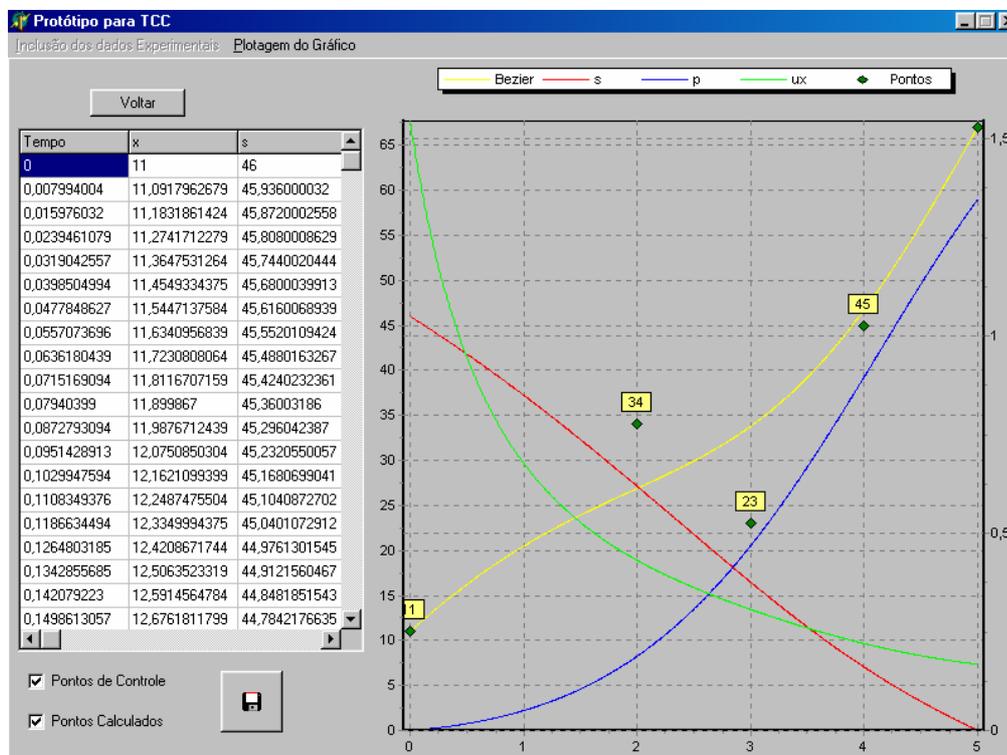
Também na figura 12 pode-se verificar os pontos calculados, neste caso o peso era 10, mais o ponto inicial.

Figura 12 — Exemplo de Plotagem com peso 10.



Pode-se observar na figura 13 que aumentando o peso (número de pontos calculados) para 1000, tem-se uma curva mais suave.

Figura 13 — Exemplo de plotagem com peso 1000



4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos pelo modelo *spline* estudado e implementado, foram comparados com os resultados obtidos com o programa Lissage e com o Microsoft Excel 97.

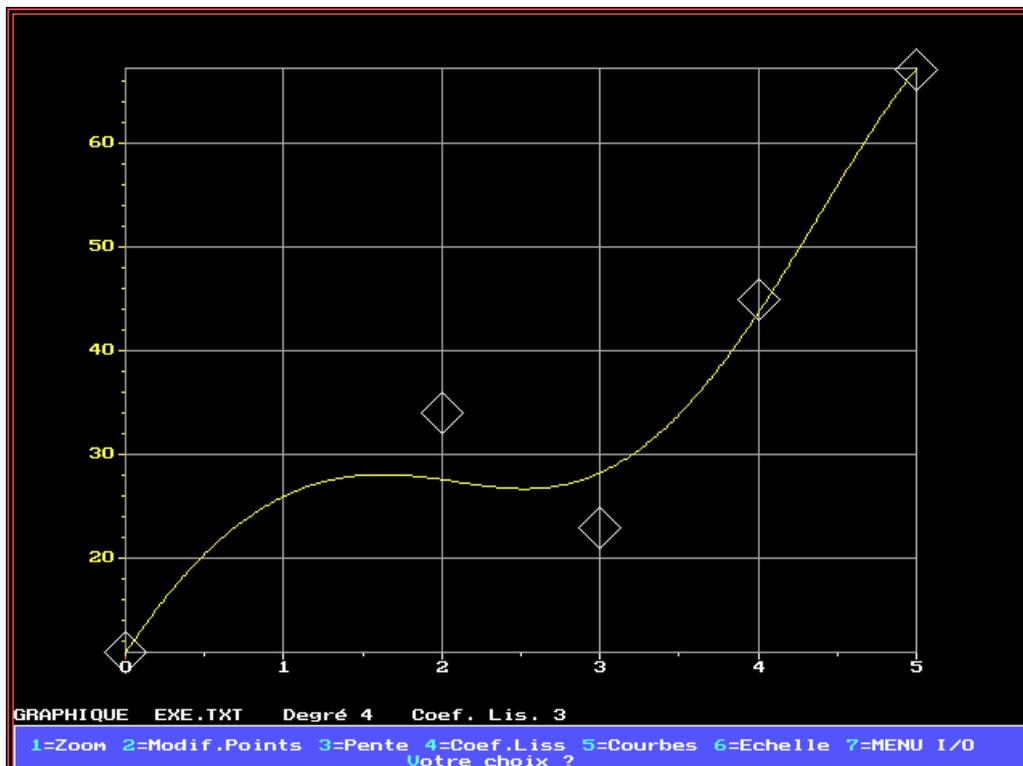
O programa Lissage² foi desenvolvido por Ardaillon-Simões. G. Arroyo, J-L Uribe Larrea. Utilizou-se deste software simplesmente pelo fato de ser utilizado por universidades, as quais tomam como resultados esperados, os seus pontos calculados.

Estas comparações foram realizadas primeiramente pela observação visual e a seguir pela avaliação dos resultados numéricos obtidos a partir do polinômio gerado pelo software Lissage e pelo Excel, respectivamente.

² lissage, cedido por Diogo A. Simões, SIMÕES (1994), é um programa de computador desenvolvido para ser executado no MS-DOS é utilizado para ajustamento de curvas.

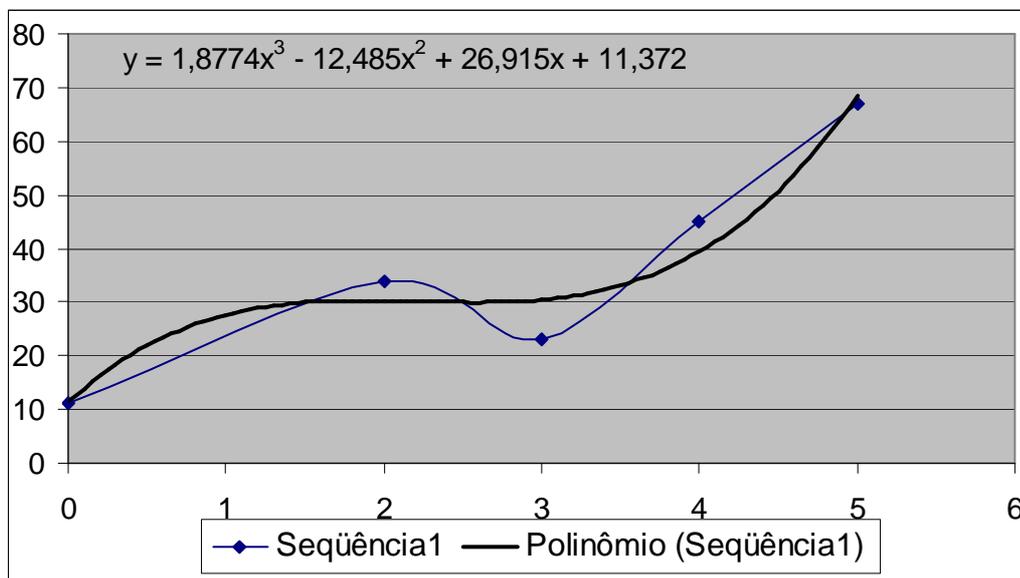
Comparando o gráfico de X (amarelo) do protótipo, pode-se ver que no lissage, os mesmo pontos são plotados diferentemente conforme figura 14 abaixo.

Figura 14 — Plotagem dos pontos no Lissage



No caso do Excel, selecionou-se um ponto qualquer de t calculado no protótipo e, utilizando o polinômio encontrado pelo próprio Excel, encontrou-se o valor de x , sendo que este apresenta um valor diferente do encontrado no protótipo, conforme demonstrado na figura 15.

Figura 15 — Cálculo do ponto no excel



Na figura 15 a seqüência 1 é a ligação dos pontos amostrados e o polinômio é a curva encontrada a ser analisada e comparada.

O ponto $t = 1,9599$, que pode ser encontrado na figura 12, quando aplicado na função apresentada na figura 15, resulta em um y no valor 30,2990. Para este mesmo valor de $t=1,9599$ obtém-se na implementação realizada neste trabalho o valor 26,6660.

5. CONCLUSÕES

Após a comparação da curva gerada pelo protótipo com aquela gerada pelo software Lissage e pelo Excel, pode-se concluir que o método *spline* denominado *Bezier* não se comporta de forma a expressar adequadamente um processo biotecnológico e por isto deverá ser realizado um estudo em outros métodos para a determinação do mais apropriado para ser utilizado no ajustamento de dados experimentais.

O cálculo da velocidade específica, que é um dos objetivos deste trabalho, esta sendo feito em cima dos pontos encontrados pela função de Bezier.

É importante ressaltar que o estudo do método *bezier* e a sua implementação em um programa computacional (protótipo), podem ser utilizados para a plotagem de outros tipos de dados não analisados neste trabalho.

A plotagem do gráfico torna-se um tanto lento quando se utiliza um peso ou um número de pontos de controle muito alto. Isto devido a recursividade ocasionada pelo fatorial e pela potenciação, de acordo também com as conclusões de Zoz (1999).

O protótipo teria uma usabilidade maior se, primeiramente, não houvesse uma diferença do gráfico encontrado com relação ao que era esperado.

5.1. LIMITAÇÕES

As principais limitações são a não aceitação do ponto como separador de decimais e da não limitação do número de pontos e pesos, este último podendo ocasionar o travamento do protótipo.

Outro obstáculo foi à falta de detalhamento, na engenharia bioquímica, de qual o modelo *spline* mais adequado de demonstrar o gráfico dos pontos.

5.2. EXTENSÕES

Pode-se realizar um estudo em outros métodos *splines* para verificar-se qual melhor representa o comportamento das variáveis de um bioprocessos.

Na fase de teste surgiu uma evidência que o método *B-spline* seria aplicável, mas isto não foi comprovado de nenhuma forma, e não foi feito nenhum estudo para a determinação do

resultado. Esta evidência surgiu por que houve um início de implementação do método, mas como não haveria tempo hábil para uma conclusão plausível, descartou-se esta comparação.

ANEXO A: ALGORITMO PARA CÁLCULO DOS PONTOS

```

procedure TTccPrincipal.TccCalculaPontosBezier;
var
  a, b, u, pt, px, ps, pp,
  pt1, px1, ps1, ppl, pux1, put1, FatorPeso, Arranjo, ExpA, ExpB: real;
  n, i, ContPontCal : integer;
begin
  // Elimina os pontos de controle do gráfico
  TccPlotagem.SeriesList.Series[4].Clear;
  TccGrigPontosPlot.RowCount := Pesos + 2;
  ContPontCal := 1;

  // Inicializa variáveis de controle geral
  u := 0;
  // Calcula o fator peso de incremento
  FatorPeso := 1/Pesos;
  n := Pontos - 1;

  while u <= (1+FatorPeso) do
  begin
    // Como o peso varia de 0 até 1 e u é o peso,
    // u varia de 0 até 1 + o fator peso para garantir que irá calcular
    // até o último peso.
    // Este WHILE tem como função de calcular o número
    // de ponto solicitados através do peso

    // inicializa variáveis específicas para
    // cada ponto calculado
    a := 1-u;
    b := u;
    i := 0;
    pt1 := 0;
    px1 := 0;
    ps1 := 0;
    ppl := 0;
    pux1 := 0;
    put1 := 0;
    while i <= n do
    begin
      // Enquanto tiver pontos de controle para serem
      // considerados, busca o ponto de controle
      // Este WHILE tem a função do somatório na
      // equação genérica
      if TccGridDadosExp.Cols[0].Strings[i+1] = '' then
        pt := 0
      else
        pt := StrToFloat(TccGridDadosExp.Cols[0].Strings[i+1]);

      if TccGridDadosExp.Cols[1].Strings[i+1] = '' then
        px := 0
      else
        px := StrToFloat(TccGridDadosExp.Cols[1].Strings[i+1]);
    end
  end
end

```

```

if TccGridDadosExp.Cols[2].Strings[i+1] = '' then
    ps := 0
else
    ps := StrToFloat(TccGridDadosExp.Cols[2].Strings[i+1]);

if TccGridDadosExp.Cols[3].Strings[i+1] = '' then
    pp := 0
else
    pp := StrToFloat(TccGridDadosExp.Cols[3].Strings[i+1]);

// Adiciona o ponto na área de plotagem
TccPlotagem.SeriesList.Series[4].AddXY(pt,px);

// Calcula a parte do polinômio referente a este
// ponto de controle
Arranjo := TccCalculaArranjo(n,i);
ExpA := TccCalculaExp(a,(n-i));
ExpB := TccCalculaExp(b,i);
pt1 := pt1 + (Arranjo * ExpB * ExpA * pt);
px1 := px1 + (Arranjo * ExpB * ExpA * px);
ps1 := ps1 + (Arranjo * ExpB * ExpA * ps);
pp1 := pp1 + (Arranjo * ExpB * ExpA * pp);
ExpA := TccCalculaExp(a,(n-i-1));
ExpB := TccCalculaExp(b,(i-1));
pux1 := pux1 + (Arranjo * i * ExpB * (n-i) * ExpA * px);
put1 := put1 + (Arranjo * i * ExpB * (n-i) * ExpA * pt);

// Passa para o próximo ponto de controle
i := i + 1;
end;
// Realiza o calculo da Velocidade específica (ux = (dx/dt)/x)
if px1 > 0 then
    pux1 := (pux1/put1)/px1
else
    pux1 := 0;

// Armazena o ponto calculado no grid.
TccGrigPontosPlot.Cols[0].Strings[ContPontCal] :=
FormatFloat('#####0.#####',pt1);
TccGrigPontosPlot.Cols[1].Strings[ContPontCal] :=
FormatFloat('#####0.#####',px1);
TccGrigPontosPlot.Cols[2].Strings[ContPontCal] :=
FormatFloat('#####0.#####',ps1);
TccGrigPontosPlot.Cols[3].Strings[ContPontCal] :=
FormatFloat('#####0.#####',pp1);
TccGrigPontosPlot.Cols[4].Strings[ContPontCal] :=
FormatFloat('#####0.#####',pux1);

// passa para o próximo ponto a ser calculado
ContPontCal := ContPontCal + 1;
u := u + FatorPeso;
end;
end;

```

ANEXO B: ALGORITMO PARA PLOTAGEM DOS PONTOS CALCULADOS

```
procedure TTccPrincipal.TccExecutaPlotagem;
var
  index : integer;
  pt, px, ps, pp, pux : real;
begin
  index := 1;
  // Limpa a área de plotagem
  TccPlotagem.SeriesList.Series[0].Clear;
  TccPlotagem.SeriesList.Series[1].Clear;
  TccPlotagem.SeriesList.Series[2].Clear;
  TccPlotagem.SeriesList.Series[3].Clear;
  while index <= (Pesos + 1) do
  begin
    // Enquanto o número de ponto selecionados for
    // menor que o peso informado
    // seleciona o próximo ponto calculado
    pt := StrToFloat(TccGrigPontosPlot.Cols[0].Strings[index]);
    px := StrToFloat(TccGrigPontosPlot.Cols[1].Strings[index]);
    ps := StrToFloat(TccGrigPontosPlot.Cols[2].Strings[index]);
    pp := StrToFloat(TccGrigPontosPlot.Cols[3].Strings[index]);
    pux := StrToFloat(TccGrigPontosPlot.Cols[4].Strings[index]);

    // Insere o ponto selecionado na área de plotagem
    TccPlotagem.SeriesList.Series[0].AddXY(pt, px);
    TccPlotagem.SeriesList.Series[1].AddXY(pt, ps);
    TccPlotagem.SeriesList.Series[2].AddXY(pt, pp);
    TccPlotagem.SeriesList.Series[3].AddXY(pt, pux);

    // incrementa o indexador
    index := index + 1;
  end;
end;
```

ANEXO C: ALGORITMO DE LEITURA DE ARQUIVO **.TCC COM OS PONTOS DE CONTROLES**

```

procedure TTccPrincipal.TccBtOpenFileClick(Sender: TObject);
var
  Fl: TextFile;
  Valor : string;
  linha, x: integer;
begin
  linha := 0;
  // abre o diálogo para escolher o arquivo a
  // ser carregado
  if OpenFileDialog.Execute then
  begin
    AssignFile(Fl, OpenFileDialog.FileName);
    Reset(Fl);
    // enquanto não for final de arquivo faça
    while not Eof(Fl) do
    begin
      linha := linha + 1;
      Readln(Fl, Valor);
      // tratamento para a primeira linha que contem
      // o número de pontos e o peso a ser utilizado
      if linha = 1 then
      begin
        x := pos(';',valor);
        TccPrincipal.TccEditAmost.Text := copy(valor,0,x-1);
        delete(valor,1,x);
        TccPrincipal.TccEditPesos.Text := valor;
        TccPrincipal.TccBtInclOk.Click;
      End
      // senão carrega o grid com os pontos de controle.
      // cada linha no arquivo equivale a uma linha de pontos
      // no grid
      else
      begin
        x := pos(';',valor);
        TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[0,linha-1] := copy(valor,0,x-1);
        delete(valor,1,x);
        x := pos(';',valor);
        TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[1,linha-1] := copy(valor,0,x-1);
        delete(valor,1,x);
        x := pos(';',valor);
        TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[2,linha-1] := copy(valor,0,x-1);
        delete(valor,1,x);
        TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[3,linha-1] := valor;
      end
    end;
    // fecha o arquivo
    CloseFile(Fl);
  end;
end;

```

ANEXO D: ALGORITMO DE GRAVAÇÃO DOS ARQUIVOS .TCC E .CAL COM OS PONTOS DE CONTROLES E PONTOS CALCULADOS RESPECTIVAMENTE

```

procedure TTccPrincipal.TccBtSalvarClick(Sender: TObject);
var
  F1: TextFile;
  Valor, S : string;
  linha, x: integer;
begin
  // Avisa o usuário como serão salvos os dados
  // .tcc para os pontos de controle
  // .cal para os pontos calculados
  if TccPrincipal.TccCheckExperimentais.Checked and
    TccPrincipal.TccCheckCalculados.Checked then
    S := '*****          ATENÇÃO !          *****' + #13 +
        #13 +
        'O arquivo dos pontos de controle terá extensão ".tcc"' + #13 +
        'O arquivo dos pontos calculados terá extensão ".cal"'
  else
    if TccPrincipal.TccCheckCalculados.Checked then
      S := '*****          ATENÇÃO !          *****' + #13 +
          #13 +
          'O arquivo dos pontos calculados terá extensão ".cal"'
    else
      S := '*****          ATENÇÃO !          *****' + #13 +
          #13 +
          'O arquivo dos pontos de controle terá extensão ".tcc"';
  MessageBeep(0);
  MessageDlg(S, mtInformation, [mbOk], 0);

  // abre o diálogo para escolher o nome e o lugar onde será
  // salvo o(s) arquivo(s)
  if SaveDialog.Execute then
  begin
    // verifica que é para gravar os pontos de controle
    if TccPrincipal.TccCheckExperimentais.Checked then
    begin
      linha := 0;
      AssignFile(F1, SaveDialog.FileName);
      Rewrite(F1);
      // grava na primeira linha o número de pontos e o peso
      valor := IntToStr(Pontos) + ';' + IntToStr(Pesos);
      Writeln(F1, valor);
      // enquanto houver pontos a serem salvos faça
      while linha < Pontos do
      begin
        linha := linha + 1;
        valor := TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[0, linha] + ';';
        valor := valor + TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[1, linha] + ';';
        valor := valor + TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[2, linha] + ';';
      end
    end
  end

```

```

        valor := valor + TccPrincipal.TccGridDadosExp.Cells[3,linha];
        Writeln(F1,valor);
    end;
    // fecha o arquivo
    CloseFile(F1);
end;

// verifica que é para gravar os pontos calculados
if TccPrincipal.TccCheckCalculados.Checked then
begin
    linha := 0;
    valor := copy(SaveDialog.FileName,0,Length(SaveDialog.FileName)-4);
    AssignFile(F1, Valor + '.cal');
    Rewrite(F1);

    // grava na primeira linha o número de pontos e o peso
    // Nota-se que o número de pontos é igual ao peso + 2
    // e o pesos é igual ao pesos dos pontos de controle
    valor := IntToStr(Pesos + 2) + ';' + IntToStr(Pesos);
    Writeln(F1,valor);
    // enquanto houver pontos a serem salvos faça
    while linha <= Pesos do
    begin
        linha := linha + 1;
        valor := TccPrincipal.TccGrigPontosPlot.Cells[0,linha] + ';';
        valor := valor + TccPrincipal.TccGrigPontosPlot.Cells[1,linha] +
';';
        valor := valor + TccPrincipal.TccGrigPontosPlot.Cells[2,linha] +
';';
        valor := valor + TccPrincipal.TccGrigPontosPlot.Cells[3,linha];
        Writeln(F1,valor);
    end;
    // fecha o arquivo
    CloseFile(F1);
end;
end;
end;

```

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BAILEY, J. *Biochemical Engineering Fundamentals*. Mac Graw-Hill, 1995
- BARSKY, Brian A. **Computer graphics and geometric modeling using beta-splines**. Berlim: Springer, 1988.
- BARTELS, Richard H.; BETTY, John C.; BARSKY, Brian A. **An introduction to splines for use in computer graphics and geometric modeling**. Los Altos: Morgan Kaufmann, 1987.
- BORZANI, Walter; LIMA, Urgel de Almeida; AQUARONE, Eugenio. **Tecnologia das fermentações**. São Paulo: Edgard Blucher, 1975. (Biotecnologia, v.1).
- CLÁUDIO, Dalcídio Moraes; MARINS, Jussara Maria. **Cálculo numérico computacional: teoria e prática**. São Paulo: Atlas, 2000.
- FERMENTAÇÃO ALCOÓLICA. **Ciências Biológicas**, [200-?] Disponível em: <<http://www.consulteme.com.br/biologia/indus.htm>>. Acesso em: 10 abr. 2001.
- FOLEY, James D. **Computer graphics: principles and practice**. 2.ed. Washington: Wesley, 1990.
- FREITAS, Eduardo. **Automação e controle de processos fermentativos**. São Paulo, SP: [s.n.], 1995.
- HILL, Francis S. **Computer graphics**. New York : Macmillan Publishing Company, 1990.
- MARTINS, Carlos Augusto Paiva da Silva. **Criando algoritmos paralelos**, Minas Gerais, set. 1999. Disponível em: <<http://www.cenapad.ufmg.br/oficina/transp/aula2/sld005.htm>>. Acesso em: 20 nov. 2000.
- MICROBIOLOGIA BÁSICA. **Cursos gratuitos**, [200-?]. Disponível em : <<http://www.livronline.com/cursos/gratuitos/index.html>>. Acesso em : 01 abr. 2001.
- MORTENSON, Michael. **Geometric modeling** New York: John Wiley, 1985.
- NEWMAN, Willian M.; SPROULL, Robert F. **Principles of interactive computer graphics**. New York : McGraw-Hill Book Company, 1991.

OLIVEIRA, Antônio M. e SILVA, Agostinho. **Biblioteca da Matemática Moderna**. Tomo IV. Lisa- Livros Irradiantes S.A. São Paulo, 1980.

PERSIANO, Ronaldo Cesar Marinho. **Introdução a computação gráfica**. Rio de Janeiro: LTC, 1989.

SCRIBAN, Rene et al. **Biotecnologia**. Tradução Maria Ermantina Galvão Gomes Pereira et al. São Paulo: Manole, 1985.

SIMÕES, D.A. Logiciel de Lissage, 1994.

ZOZ, Jeverson. **Estudo de métodos e algoritmos de *splines bezier, cateljau e b-spline***. 1999. 64 p. Monografia (Bacharelado em Ciências da Computação), Universidade Regional de Blumenau, Blumenau.

WARD, Owen P. **Biotecnologia de la fermentacion: principios, procesos y productos**. Tradução Miguel Calvo Bebollar e Emilia Sevillano Calvo. Zaragoza: Acribia, 1991.

THALMANN, Nádía; THALMANN, Daniel. **Computer Generated**. Tokyo: Springer-Verlag, 1985. 497p.