# $Sis A^3$ : Uma abordagem para cálculo do volume de produtos agrícolas em armazéns

Wagner Guimarães Al-Alam <sup>1</sup>
Tâmara Costa do Nascimento <sup>2</sup>
Maurício Lima Pilla<sup>3</sup>
Renata Hax Sander Reiser <sup>3</sup>
João Ladislau Lopes<sup>4</sup>
Rodrigo Santos de Souza <sup>4</sup>
Ana Marilza Pernas <sup>3</sup>
Adenauer Corrêa Yamin <sup>3</sup>
Cláudio Fernando Resin Geyer <sup>4</sup>

**Resumo:** Este trabalho objetiva contribuir para a automação do processo de auditoria, propondo uma abordagem para cálculo de volume de produtos agrícolas em armazéns, denominada  $SisA^3$ . O volume é obtido a partir de dados fornecidos por um equipamento digitalizador, o qual gera uma matriz de dados baseada nos pontos do relevo, em geral não uniforme, definida pelo produto estocado. Para avaliar as funcionalidades do  $SisA^3$ , são apresentados dois estudos de caso, destacando os protótipos desenvolvidos e os resultados obtidos com sua implementação e paralelização.

*Palavras-chave*: Modelagem Tridimensional de Relevo, Cálculo de Volume, Processamento Paralelo.

**Abstract:** This work aims to contribute to the automation of the audit process, proposing an approach for calculating volume of agricultural products in warehouses, named  $SisA^3$ . The volume is obtained from data provided by a scanner device, which generates an array of data based on the points of the topography, generally non-uniform, defined by the stored product. To evaluate the functionality of the  $SisA^3$  we present two case studies, highlighting the prototypes developed and the results obtained with its implementation and parallelization.

Keywords: Three-dimensional Modeling of Topography, Volume Calculation, Parallel Processing

# 1 Introdução

O processo de auditoria executado de forma manual possui baixa precisão, apresentando diversos pontos falhos, decorrentes da aproximação das figuras geométricas empregadas na representação dos volumes, ou associados aos erros de arredondamento quando das medições. Ainda, nos processos de inventário de armazéns, o fluxo de produtos usualmente precisa ser interrompido, o que implica elevação do custo financeiro, visto que o restante da planta industrial deixa de produzir. Além disso, os produtos agrícolas podem deteriorar-se rapidamente quando não tratados, o que torna essencial o funcionamento contínuo das indústrias nos períodos de safra [4]. Considerando esse cenário, um processo de auditoria automatizado, além de proporcionar confiabilidade, pode reduzir os custos decorrentes da interrupção da produção. Com a execução automática, é minimizada a necessidade de retrabalho, situação que ocorre no processo manual [1].

http://dx.doi.org/10.5335/rbca.2014.3690

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup>Universidade Federal do Ceará

<sup>{</sup>alalam@lia.ufc.br}

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>Universidade Católica de Pelotas

<sup>{</sup>tamnasc@hotmail.com}

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>Universidade Federal de Pelotas

<sup>{</sup>pilla,reiser,marilza,adenauer@inf.ufpel.edu.br}

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup>Universidade Federal do Rio Grande do Sul

<sup>{</sup>jlblopes,rssouza,geyer@inf.ufrgs.br}

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema computacional, multidisciplinar, denominado de Sistema automatizado de auditorias em armazéns ( $SisA^3$ ), integrando quatro áreas: (i) a computação científica, como solução matemática para modelagem e cálculo de volume de superfícies não uniformes; (ii) o processamento paralelo e distribuído, no desenvolvimento paralelizado dos protótipos, incluindo a execução em dispositivos multicore; (iii) a robótica, no desenvolvimento de um equipamento digitalizador de relevos; e (iv) a visualização científica, que trata da modelagem de objetos reais em computadores, assim como a manipulação de seus elementos.

A proposta do  $SisA^3$  integra técnicas numéricas para cálculo de volume e técnicas de visualização científica para modelagem de relevo tridimensional, com exploração do paralelismo para ganho de desempenho. Também, emprega uma tecnologia de medição a laser na coleta automática de dados, viabilizando a digitalização de pontos e a modelagem do relevo. De forma específica, a proposta considera o desenvolvimento de dois componentes: (i) os protótipos de software denominados de  $iCone-SisA^3$  e  $p-iCone-SisA^3$ , provendo soluções computacionais para cálculo do volume de superfícies não uniformes; e (ii) o protótipo híbrido de hardware e software denominado  $DigSisA^3$ , referente ao equipamento digitalizador.

Este artigo está organizado da seguinte forma: na seção 2, são analisados os trabalhos relacionados. A modelagem do relevo é apresentada na seção 3. A arquitetura do  $SisA^3$  é descrita na seção 4 e, na seção 5, são destacados os protótipos para cálculo de volume de relevos. O equipamento digitalizador é descrito na seção 6. Os resultados obtidos são apresentados na 7 e, por fim, as conclusões são apresentadas na seção 8.

## 2 Trabalhos relacionados

Lin e Fun [10] descrevem o problema do cálculo do volume de armazéns e propõem sua resolução por meio da extração de vídeos e posterior tratamento das imagens. Inicialmente, as cores da imagem são extraídas e convertidas do espaço *Red Green Blue* (RGB) para o espaço *Hue Saturation Intensity* (*Brightness*) (HSI). Segue-se a extração das arestas delimitando o espaço que define a imagem do produto e aplica-se um *benchmark* retangular para identificação da área da região. Nessa etapa efetua-se o cálculo do volume pelo gradiente de cores, o qual define a profundidade da área identificada.

Lin e Jiang [11] apresentam uma metodologia que consiste no emprego de fotografias para obter a identificação de imagens dos agrupamentos de produtos no armazém. Existe a necessidade de inserção de marcações em cores diferenciadas da coloração do produto, para efetuar a correção dos erros de perspectiva. Após a identificação das arestas limitantes do armazém em cada fotografia, o relevo é modelado e calculado, seguindo-se a análise e correção de erros, inerentes a esse processo. por não ser um método totalmente automatizado, é necessária uma etapa de pré-tratamento dos dados para modelagem e cálculo do volume.

Charoenpong et al. [3] propõem uma técnica iterativa para o cálculo do volume aplicado à fruta manga, considerando a integração de fatias virtuais. Os dados de entrada correspondem a medidas obtidas pelo tratamento de imagens, a partir de fotos da fruta, considerando três planos: vista superior, vista lateral e vista frontal. O cálculo do volume considera a divisão do relevo em fatias, geometricamente modeladas por elipses. A partir do produto da área da elipse pela profundidade da fatia, o volume da fruta é determinado.

Os métodos baseados no tratamento de imagens apresentam uma relação direta com a qualidade das fotografias ou dos vídeos, sendo a luminosidade um fator de grande relevância. A baixa luminosidade característica da maioria dos armazéns graneleiros, e a possível ocorrência da dispersão de poeira no ar são situações que inserem ruído na aquisição das imagem, acrescentando fontes de erros nos métodos numéricos. Tem-se nesses métodos, frequentemente, baixa confiabilidade nas soluções para o problema de cálculo do volume em superfícies não uniformes. Diferentemente dos trabalhos baseados no processamento de imagens, a proposta do sistema  $SisA^3$  contempla o cálculo automatizado do volume, sem a necessidade de contato manual com o produto, tornando-se menos vulnerável a interferências do meio, como poeira e/ou níveis de luminosidade. Ainda, apresenta um custo acessível, quando comparado com outras propostas comercialmente disponíveis que fazem medição a laser.

A metodologia proposta para o  $SisA^3$  é baseda na integração de trapézios para o cálculo de áreas e na integração do volume de subfatias. Os pontos-chave dessa metodologia correspondem à divisão do relevo em fatias, à redivisão das fatias em subfatias, pela interpolação numérica por *splines*, e ao cálculo da área das subfatias por meio da integração trapezoidal, chegando-se a um volume parcial definido pelo produto da área de cada subfatia

conforme sua profundidade. O volume final consiste no somatório das diversas subfatias que definem o objeto medido. No que diz respeito ao algoritmo de integração de volume de cubos unitários, tem-se um funcionamento semelhante ao algoritmo apresentado em [3]. A principal diferença deve-se ao fato de que o volume é obtido pelo preenchimento da fatia por cubos unitários e, ao final do preenchimento, realiza-se o somatório de todos os cubos utilizados. O cálculo do volume resulta do produto do total de cubos pelo volume associado ao cubo unitário, sendo o comprimento de cada fatia determinado pela aresta do cubo.

## 3 Modelagem matemática do relevo

A entrada de dados para modelagem matemática do relevo consiste na matriz tridimensional, cujos valores das coordenadas são calculados a partir das medidas obtidas pelo equipamento digitalizador  $DigSisA^3$  e referenciados de acordo com o espaço euclidiano (3D), representando: (i) no eixo  $\overrightarrow{OX}$ , o sentido das medições; (ii) no eixo  $\overrightarrow{OX}$ , a evolução temporal do processo de medição; e (iii) no eixo  $\overrightarrow{OY}$ , a altura dos pontos coletados. Nesse contexto, o armazenamento de todas as coordenadas dos pontos reais que compõem grande parte de uma superfície não uniforme é computacionalmente inviável. Visando à preservação de propriedades matemáticas e geométricas que determinam a fidelidade da superfície modelada, consideram-se as funções de aproximação obtidas pela técnica de interpolação polinomial cúbica por *splines* [5], geradas a partir de pontos obtidos no processo de digitalização.

O termo *spline* refere-se à longa e flexível barra de metal utilizada pelos desenhistas e engenheiros para delinear as superfícies de aviões e navios. A equivalente expressão matemática a essa barra, *spline cúbica natural*, consiste na continuidade da polinomial cúbica, a qual considera a posição, a inclinação e a curvatura como parâmetros. As *splines* são formas suaves de modelagem de curvas paramétricas cúbicas [2] [8] [14].

Tem-se  $\mathcal{Q}(u)=(X(u),Y(u))$  como uma curva bidimensional e parametrizada, tal que X(u) e Y(u) são funções definidas pelo parâmetro u. X(u) e Y(u) são conhecidas por meio de pontos na curva  $\mathcal{Q}(u)$ , para qualquer valor de u, respectivamente. X(u), Y(u) são funções polinomiais, logo, são consideradas computacionalmente eficientes e de fácil manipulação. Porém, nem sempre é possível modelar a curva  $\mathcal{Q}(u)$  aplicando somente uma função. Para modelar essa possível irregularidade, considera-se o particionamento da curva em segmentos, sendo u é o parâmetro que varia do ponto inicial  $u_{min}$  ao ponto final  $u_{max}$ . Cada parâmetro u, determinado pelas correspondentes funções polinomiais X(u) e Y(u), é denominado de nó e corresponde à ligação entre um segmento e o seu sucessor, com exceção dos nós extremos,  $u_{min}$  e  $u_{max}$ , não decrescente, ou seja:

$$u_0 \le \dots \le u_j = u_{min} \le \dots \le u_l = u_{max} \le \dots \le u_n.$$

Assim, a sequência de nós  $\{u_k\}_{0 \leq k \leq n} = [u_0,...,u_j,...,u_l,...,u_n]$  é denominada de vetor de nós. A componente X(u) está segmentada por um conjunto de funções polinomiais, que cobrem todo o intervalo de definição do parâmetro u, considerando os segmentos, variando de  $u_{min}$  a  $u_{max}$ . O mesmo ocorre no componente Y(u). Além disso, cada componente satisfaz condições de continuidade nas junções entre sucessivos segmentos polinomiais, garantindo, também, a existência e a unicidade para a função diferencial de várias ordens.

Dado m+1 pontos,  $P_0,...,P_m$ , tem-se a definição da curva por m polinômios cúbicos, em que cada par de pontos  $(P_i,P_{i+1})_{0\leq i\leq m-1}$  determina o i-ésimo segmento e está conectado por um polinômio  $X_i$ . Em geral, as coordenadas X(u) dos pontos da curva são determinados somente pelas coordenadas  $x_0,...,x_m$ , ocorrendo o mesmo com os outros eixos, ou seja, o cálculo de cada polinômio é obtido de forma independente em cada coordenada.

Cada segmento  $[x_i, x_{i+1}]$  possui uma função polinomial cúbica no parâmetro u dada pela expressão  $X_i(u) = a_i + b_i u + c_i u^2 + d_i u^3$ , satisfazendo as seguintes condições:

$$X_i(0) = x_i = a_i$$
 e  $X_i(1) = x_{i+1} = a_i + b_i + c_i + d_i.$  (1)

Considerando os quatro coeficientes  $a_i, b_i, c_i, d_i$ , os quais determinam completamente a função  $X_i(u)$  e a continuidade das funções nos pontos dos segmentos inicial e final, aplica-se a primeira derivada  $D_i$  de X(u) em cada nó  $u_i$  e obtém-se:  $X^{(1)}(0) = D_i$   $X^{(1)}(1) = D_i$   $X^{(1)}(1) = D_i$   $X^{(2)}(1) = D_i$   $X^{(2)}(1) = D_i$   $X^{(2)}(1) = D_i$   $X^{(3)}(1) = D_i$   $X^{(4)}(1) = D_i$  X

otém-se: 
$$X_i^{(1)}(0) = D_i = b_i \quad eX_i^{(1)}(1) = D_{i+1} = b_i + 2c_i + 3d_i.$$
 (2)

Pelas equações em (1) e (2), as coordenadas de X(u) correspondem à solução do sistema (3):

$$\begin{cases}
 a_i = x_i, & c_i = 3(x_{i+1} - x_i) - 2D_i - D_{i+1} \\
 b_i = D_i, & d_i = 2(x_i - x_{i+1}) + D_i + D_{i+1}
\end{cases}$$
(3)

De forma análoga, são obtidos os coeficientes referentes a Y(u). Portanto, ao final, tem-se a identificação de todos os pontos intermediários do intervalo de interpolação.

Pela interpolação por *splines* é gerada uma quantidade de pontos interpolados inúmeras vezes superior à de pontos coletada pelo instrumento digitalizador, pelo qual se define a matriz de entrada.

# 4 Arquitetura do sistema Sis A<sup>3</sup>

Conforme mostra a Figura 1, a arquitetura do  $SisA^3$  é constituída pelos componentes descritos a seguir: (i) software iCone e p-iCone para executar o cálculo do volume estocado; e (ii) hardware digitalizador  $DigSisA^3$  responsável por efetuar medições no relevo e gerar a entrada de dados para execução dos componentes de software.

O sistema de *hardware* do digitalizador integra três equipamentos: (i) sistema de medição: composto por um sensor ótico a laser e um sistema de espelhos, que articulam a movimentação e possibilitam a varredura linear sobre o relevo, enviando as medições para o processador via rede sem fio por *bluetooth*; (ii) suporte articulado: compreende o sistema eletromecânico/ótico para movimentação angular de um espelho que direciona o laser do sensor ótico, sendo composto por motores de passo e respectivas interfaces de controle; e (iii) processador: caracterizado por um sistema computacional de uso geral, podendo ser um *laptop*, PDA, *tabletPC*, ou ainda um *smartphone*, possuindo interface de comunicação *bluetooth* e USB (para comunicação do controlador de motor de passo).

O sistema de software do  $DigSisA^3$  é responsável pelo controle das medições e exportação da matriz tridimensional, integrando quatro módulos: (i) módulo de controle de movimento: responsável pela comunicação com a interface de controle do motor de passo para posicionamento do laser; (ii) módulo de leitura de medição: responsável pela comunicação com o sensor ótico, solicitando as medições e recebendo os resultados; (iii) módulo de cálculo da posição do ponto: captura os valores dos módulos de leitura de medição e de controle de movimento, além dos parâmetros pré-definidos no início da medição, calculando também a posição espacial dos pontos; e (iv) módulo de saída: provê uma representação externa da matriz tridimensional capturada e a armazena em um arquivo XML.

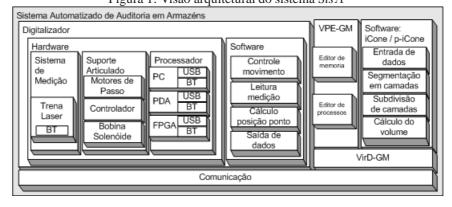


Figura 1: Visão arquitetural do sistema  $SisA^3$ 

No suporte ao desenvolvimento do sistema  $SisA^3$ , são empregadas duas ferramentas do projeto Distributed Geometric Machine (D-GM): (i) o ambiente de desenvolvimento Visual Programming Environment for the Geometric Machine Model (VPE-GM); e (ii) o ambiente de execução distribuída VirD-GM (Virtual Distributed Geometric Machine Model) [12, 6]. O VPE-GM adiciona recursos que possibilitam a modelagem e a seleção das etapas de paralelização, incluindo representação visual, validação de parâmetros e controle dos processos na etapa de desenvolvimento, de forma a satisfazer as necessidades do protótipo. O VirD-GM é responsável por receber os arquivos descritores exportados pelo ambiente VPE-GM, coordenando a leitura das estruturas de processos, de memória e dos parâmetros para execução e gerenciando o controle da execução da computação baseado nos dados obtidos junto às matrizes de adjacências. Assim, o protótipo p-iCone consiste em um caso de estudo que também contribui com a validação do ambiente VirD-GM.

As seções 5 e 6 apresentam de forma detalhada os componentes que constituem a arquitetura proposta para o sistema  $SisA^3$ .

## 5 Protótipos para cálculo de volume de relevos não uniformes

Na concepção da proposta, foram consideradas principalmente duas grandes áreas de pesquisa: (i) a computação científica, baseada em técnicas, métodos e processos do cálculo numérico para o desenvolvimento de software numérico no âmbito científico e tecnológico [5, 8, 7, 14], fundamentando a modelagem matemática para a análise dos erros para os métodos numéricos empregados; e (ii) o processamento paralelo e distribuído, que introduz uma solução para melhoria de desempenho no processamento numérico caracterizado como intensivo e de elevada complexidade.

Com o funcionamento interno semelhante, os protótipos *iCone* e *p-iCone* diferenciam-se pela estratégia de acesso à memória e pela inicialização dos processos que podem ser sequenciais ou concorrentes. Parte-se da apresentação da abordagem sequencial e, posteriormente, é discutida a abordagem paralela e/ou distribuída, assim como suas estruturas de controle do paralelismo.

### 5.1 Protótipo iCone

A metodologia de integração do volume de subfatias é implementada por meio do protótipo *iCone*. O algoritmo desse protótipo considera quatro etapas para o cálculo do volume, as quais são descritas a seguir.

#### Processamento da entrada

Partindo de uma matriz tridimensional que representa o relevo de produtos, obtida pelo  $DigSisA^3$ , temse a entrada de dados para o iCone, contendo as coordenadas dos pontos que definem o relevo, calculam-se os polinômios de interpolação, cujos coeficientes são armazenados em nova estrutura matricial. Assim, os polinômios de interpolação referentes a cada fatia correspondem às linhas dessa estrutura matricial.

# Segmentação da matriz

Cada fatia é definida pelo intervalo de pontos localizado entre as medições de Z(i) e Z(i+1), cujos respectivos polinômios de interpolação já foram previamente calculados na etapa de processamento da entrada.

Nas medições dos pontos, em cada iteração, os valores para Z(i), com i indicando o índice do passo de medição, são mantidos constantes. A partir dessa etapa, cada fatia pode ser processada de forma autônoma, deixando de existir dependências de dados.

## Divisão da matriz de pontos

Além do cálculo do volume das camadas, essa etapa apresenta estratégias para melhoria na precisão e controle de erros do algoritmo. Como o processo da divisão de fatias em subfatias não apresenta dependência de dados, pode ser executado tanto sequencial quanto paralelamente, dependendo somente da estratégia adotada.

Em decorrência da segmentação em fatias, ocorre a inconveniente formação de degraus na modelagem do relevo. Para se reduzir o efeito computacional dessa deformação, a quantidade de fatias é alterada pela aplicação da interpolação polinomial cúbica, obtendo-se a construção de fatias intermediárias. Assim, tem-se a geração de nova matriz, com fatias de tamanho padronizado, as quais são utilizadas para o cálculo de volume.

Na etapa da divisão das fatias, faz-se a inserção de camadas na matriz por meio da interpolação entre os pontos reais, criando pontos aproximados na direção do eixo Z. Dessa forma, obtendo-se uma nova matriz com uma quantidade elevada de pontos e, assim, chega-se a um valor mais próximo do valor real do volume.

Na metodologia *iCone*, a quantidade de subdivisões é definida pelo critério de tamanho máximo de uma subfatia após a divisão, parâmetro previamente definido na inicialização do programa. Por esse parâmetro, calcula-se em quantas partes cada intervalo de medição real será dividido, para que não seja ultrapassado o limite previamente

definido.

A estratégia de implementação, escolhida pelo usuário, depende da quantidade de pontos coletados e da precisão desejada. Como o processamento sequencial da execução pode tornar-se computacionalmente inviável, justifica-se uma abordagem paralela e/ou distribuída. A interpolação dos pontos intermediários é efetuada por um polinômio linear nos eixos Y e Z. Salienta-se que no eixo X é aplicada a interpolação por splines cúbicas, o que aproxima as sub-fatias interpoladas do relevo original.

O cálculo da área é efetuado a partir da face (poligonal) de cada fatia, considerando os dados dos pontos sob a visão bidimensional, ignorando as coordenadas do eixo Z. A partir do gráfico formado pelos pontos com coordenadas X e Y, aplica-se a integração trapezoidal para o cálculo da área. A Figura 2 mostra uma representação pelo corte feito na matriz tridimensional de pontos, sendo cada ponto identificado com uma seta.

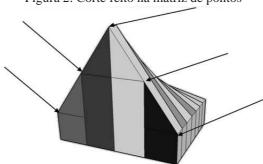
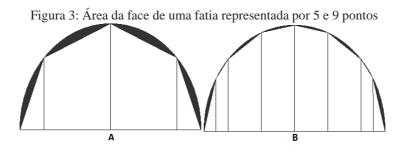


Figura 2: Corte feito na matriz de pontos

Essa integração trapezoidal, associada à subdivisão das fatias já apresenta uma razoável aproximação do valor real. Entretanto, para se obter um valor mais preciso, considera-se um novo processo complementar nessa etapa do algoritmo.

Como uma sessão transversal em um cone apresenta a forma de uma hipérbole, caracterizando as seções feitas no relevo de produtos, a nova etapa aplica a interpolação polinomial cúbica por splines nos pontos bidimensionais X e Y da face dessa subfatia. Assim, por meio da aplicação da interpolação por splines, permite-se que a quantidade de trapézios identificados na face da subfatia seja aumentada, por meio da divisão dos pontos originais em n novos pontos. Com o aumento da quantidade de trapézios, o erro no cálculo da área diminui. Na Figura 3 imagem A tem-se a representação bidimensional que em cinco pontos determina a área limitada pelos segmentos lineares. Na imagem B, a mesma área foi redividida em nove pontos, reduzindo significativamente a quantidade não considerada, observando o ponto médio de cada intervalo.

Esse processo apresenta uma eficiência maior que o processo da divisão em subfatias, pois não é necessária a divisão por uma quantidade excessiva de pontos. Com o valor da área da face da fatia já conhecido, multiplica-se esse valor pela profundidade, obtendo-se o volume parcial referente a uma subfatia.



#### Geração do resultado final

Na última fase do algoritmo, ocorre o somatório final dos volumes parciais, considerando os resultados de cada fatia, para alcançar o valor do volume total do relevo. Isso é executado sequencialmente no algoritmo, entretanto nas abordagens paralela e distribuída, caracteriza uma barreira de sincronização, de modo que somente será executada após terem sido calculadas todas as etapas anteriores.

#### 5.2 Prototótipo *p-iCone* - estratégia paralela e distribuída

A paralelização do protótipo *iCone*, denominada de *p-iCone*, foi concebida sob duas visões distintas de execução: (i) em processadores *multicore* (memória compartilhada), caracterizada pela exploração de *threads*, com processamento paralelo em uma máquina de *n* núcleos e redução no tempo de execução; e (ii) com processamento paralelo e distribuído (memória distribuída), foi desenvolvida sobre a arquitetura VirD-GM, que implementa todas as abstrações necessárias para a exploração do paralelismo do protótipo *p-iCone*.

A execução é gerenciada pelos módulos que compõem o VirD-GM e a configuração de memória e processos é modelada no VPE-GM, conforme mostra a Figura 4. A memória de entrada é representada por uma matriz tridimensional com os pontos que devem ser aplicados no algoritmo, no qual a posição de saída aguarda o retorno do parâmetro com o valor do volume. A geração da matriz de entrada é feita por um processo elementar (invert¹). Na sequência, tem-se o cálculo dos polinômios de interpolação na etapa de segmentação (segm²). O paralelismo é explorado por processos síncronos que aplicam a mesma função a intervalos distintos de dados. Ao final da execução dos processos paralelos, é efetuado o somatório dos resultados parciais  $subdiv^k$ , k = 3(1)7, retornando, assim, à posição de memória definida como saída, o resultado final (sumc²4). Essa etapa é precedida por uma barreira de sincronização. O somatório final contém os resultados de cada fatia e o valor do volume total do relevo.

# 6 Equipamento digitalizador *DigSisA*<sup>3</sup>

No sistema  $SisA^3$ , são empregadas tecnologias que possibilitam o sensoriamento de distâncias e de ângulos eletronicamente. Tais tecnologias são providas por um digitalizador, combinando os dados coletados com cálculos que permitem a geração de uma matriz tridimensional de representação do relevo.

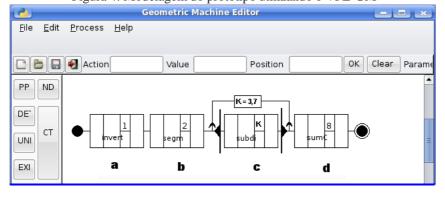


Figura 4: Modelagem do protótipo utilizando o VPE-GM

A infraestrutura física de suporte ao digitalizador  $DigSisA^3$  está organizada por três sistemas de hardware: (i)  $sistema\ de\ medição$ , contendo uma trena eletrônica a laser, com possibilidade de acionamento por uma interface bluetooth; (ii)  $sistema\ de\ processamento$ , que pode ser representado por diferentes dispositivos computacionais (PC, PDA ou FPGA) providas de interface para conexões (USB, Bluetooth); (iii)  $sistema\ de\ suporte\ articulado$ , composto de controladores e atuadores, sob forma de bobina solenoide e motores de passo responsáveis pelo deslocamento angular preciso e incluindo bloqueio de posição.

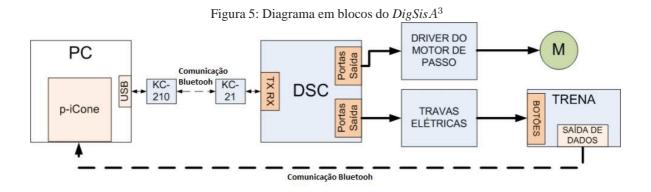
Os recursos de hardware são mapeados para quatro abstrações básicas, modelando a implementação dos programas utilizadas na composição do ambiente de software para o  $DigSisA^3$ : controle de movimento, leitura de medição, determinação do ponto representando a posição de medida, e formatação de dados para o execução do

método numérico.

A partir de um ponto inicial e com a trena na posição vertical, efetua-se uma primeira medição de distância. Após, aplicam-se movimentos angulares sobre a trena no sentido transversal ao armazém até o limite lateral, previamente parametrizado. Os valores de leitura da distância e do correspondente ângulo são armazenados juntamente com parâmetros medidos na etapa de calibração para, posteriormente, se determinar na matriz de representação o posicionamento de cada ponto no plano tridimensional. Assim, cada linha da matriz de representação do relevo está associada a um passo de medição. O reposicionamento do equipamento em diversos pontos do armazém garante uma representação completa do relevo.

O sistema eletrônico, cujo diagrama em blocos é mostrado na Figura 5, possui um componente eletrônico, que serve de interface de comunicação entre o processador e o controle dos atuadores por meio de um controlador digital de sinais (DSC). Esse controlador une características de um microcontrolador e um processador digital de sinais (DSP). Desse modo, integram-se o processamento rápido para cálculos matemáticos e o controle de dispositivos.

O sistema envia os comandos para o DSC por Bluetooth, o qual processa os dados, codificando os comandos para os drivers dos motores de passo, a fim de realizar a movimentação mecânica. A comunicação entre o DSC e o PC é viabilizada pelo emprego de um protocolo, que reconhece os comandos para os movimentos do suporte eletromecânico. O acionamento dos botões dessa comunicação é simulado por travas elétricas, viabilizando a leitura da distância (em metros) dos parâmetros que definem o relevo formado pelos grãos armazenados. O circuito do acionamento das travas elétricas é uma ponte H, para acionamento de motores de corrente contínua, possibilitando a inversão do sentido de rotação desses, com o uso de apenas dois bits de comando. Os dados coletados pela trena são enviados diretamente ao PC (via Bluetooth), para a geração da matriz de dados, que servirá de entrada para o protótipo p-iCone.



O mercado de equipamentos digitalizadores baseados em laser apresenta soluções semelhantes, porém, com restrições de alcance e/ou com custo relativamente elevado, por exemplo, o modelo  $AR4000 \, da \, Acuity$ . Além desse, outros modelos de scanners tridimensionais estão no mercado, entretanto apresentam custos elevados e necessidade de movimentação para eliminar possíveis sombras formadas por sobreposições do relevo. As principais vantagens do  $SisA^3$  decorrem da integração entre a metodologia científica (interpolação numérica por spline) e a tecnologia usada na construção do equipamento de medição (atuadores para movimentação de trena laser).

# 7 Resultados obtidos

Apresentam-se dois estudos de caso para validação dos protótipos *iCone* e *p-iCone*, que abordam análise de erro e de desempenho, respectivamente. Nesses estudos, foram realizados testes com conjuntos de dados específicos e em diferentes arquiteturas multiprocessadas, ou seja, execução em grade de computadores e *multicore*.

#### 7.1 Estudo de caso para análise de erro no protótipo iCone

Para este estudo, consideram-se objetos regulares (figuras geométricas), com volume previamente conhecido, no intuito de aproximar as principais formas geométricas do relevo formado pelos produtos armazenados. Nesse critério de seleção, optou-se pela figura de cones regulares para extração de pontos e validação do protótipo. Especificamente, tem-se um cone reto (C(h,r)), onde r e h correspondem a medida do raio da base e da altura do cone, respectivamente. O volume é obtido pela aplicação da fórmula analítica dada pela expressão:

$$V = (\pi/3 \times r^2 \times h),\tag{4}$$

Considerando os seguintes parâmetros:  $20~{\rm metros}$  de altura e  $5~{\rm metros}$  de raio (C(20,5)) obtém-se como volume:

$$V = 261,7993878 \times 2 = 523,5987756. \tag{5}$$

Na análise de erros, considera-se para o cálculo do erro absoluto e relativo, as eqs.:

$$Erro_{absoluto} = |(Valor_{Exato} - Valor_{Aproximando})|;$$
 (6)

$$Erro_{relativo} = (Erro_{absoluto}/Valor_{Exato}),$$
 (7)

O método *iCone* para cálculo do volume e o sistema de medição pode ser reconfigurável, reduzindo o intervalo de deslocamento da trena e número de pontos coletados para geração dos parâmetros (distância e ângulo).

A Tabela 1 mostra a evolução dos resultados obtidos nas sucessivas iterações do algoritmo e resume a análise dos correspondentes erros relativos ao semicone SC(20,5). O número n de iterações determina o número de fatias do relevo. Pela análise dos resultados, identificou-se que a partir de n=10, os resultados gerados, tanto pelo cálculo direto quanto pelo processo de subdivisão das fatias, mostram-se próximos do valor obtido na eq. (5).

Com o aumento da quantidade de subdivisões por fatia, o resultado converge para o valor real, conforme pode ser visualizado na última linha da tabela, quando se divide uma fatia em n=100 fatias menores. Nesse último teste, cada subdivisão de uma fatia apresentando 1.0 cm de profundidade e um erro relativo no cálculo do volume, pela eq. (7), de aproximadamente  $Erro_{relativo}=0,09\%$ , demonstrando a viabilidade do método desenvolvido.

#### 7.2 Estudo de caso para análise de desempenho no protótipo p-iCone

O protótipo *p-iCone* utiliza o mesmo algoritmo que implementa o protótipo *iCone*, diferenciando-se somente na estratégia (distribuída e/ou paralela) de execução. Verificou-se, assim, em ambas as estratégias, os mesmos valores de erros para os testes efetuados.

A simulação das matrizes de dados para mapeamento e geração das coordenadas que definem as alturas do relevo está baseada na técnica denominada heightmap [13]. A partir de uma figura bidimensional, a aplicação de heightmap possibilita a geração de um relevo tridimensional, baseado na altura dos pontos associados ao gradiente de cores, em que cada cor representa um valor de altura. Nesse contexto, fez-se uso dessa técnica para a geração de uma matriz de  $100 \times 100$ , modelando pontos do relevo. Utilizam-se, também, 10.000 subdivisões de cada fatia e 100 divisões nos pontos da área de cada camada correspondente. A matriz associada aos parâmetros de execução utilizados promoveu a execução sequencial com tempo de execução em torno de 5 horas, tempo obtido pela média de oito execuções e que sugere a exploração de técnicas para melhoria de desempenho.

#### Estratégias de execução

A execução paralela no ambiente VirD-GM foi implementada em duas arquiteturas: (i) arquitetura multinúcleos; e (ii) grade de computadores multinúcleos, considerando um conjunto homogêneo de nodos selecionados. O nodo VirD-base é responsável tanto pelo escalonamento das tarefas quanto pelo controle do fluxo de dados. Para a análise de desempenho da versão sequencial, a fim de avaliar o speedup, utilizou-se computadores multicore, porém com restrições no sistema operacional, definidas parametricamente, para que fosse utilizado somente um núcleo. A seleção dos testes é apresentada a seguir, tendo sido efetuadas sete amostras de cada configuração. Os valores apresentados foram a média dos resultados e a média dos desvios padrões, os quais resultaram em valores em torno de 0,75%, e em ambos os casos não excedendo 1,31%.

Tabela 1: Resultados da análise de erros do estudo de caso *iCone* (sequencial)

n	Volume	Volume (A/10)	Profundidade (mm)	EA	ER
1	211.4418	212.2856	100	49,5138	23.32%
2	, -	,		*	- ,
2	236,4418	237,1644	50	24,6350	10,39%
3	244,7751	245,4581	33,3333	16,3413	6,66%
4	248,9418	249,6063	25	12,1931	4,88%
5	251,4418	252,0962	20	9,7032	3,85%
6	253,1085	253,7566	16,6667	8,0428	3,17%
7	254,2489	254,9431	14,2857	6,8563	2,69%
8	255,1918	255,8333	12,5	5,9661	2,33%
9	255,8862	256,5261	11,1111	5,2733	2,06%
10	256,4418	257,0808	10	4,7186	1,84%
100	260,9418	261,577	1	0,2224	0,09%

## Execução em grade de computadores monoprocessados

Cada computador possui um processador (*dual core*) intel 2140 (1.6 GHz), com 994 MB de memória RAM e comunicação por meio de rede *ethernet* de 100 Mbits. O escalonamento foi feito de tal forma que apenas um processador por nodo fosse utilizado. Para o cálculo do *speedup*, considerou-se a eq. 8 sobre os tempos médios de execução para versões sequencial e paralela:

$$Speedup = (Tempo_{Sequencial}/Tempo_{Paralelo}). (8)$$

Na Figura 6 (A), utilizando os mesmos parâmetros para execução, verifica-se uma variação na quantidade de núcleos ativos para execução e na quantidade de computadores. O ganho de desempenho apresentado pela distribuição em uma grade de computadores com arquitetura monoprocessada é mostrada na Figura 6 (B), na qual se tem a eficiência da paralelização, representada no eixo vertical, associada à variação da quantidade de nodos, representada no eixo horizontal.

18 100,00% 90,00% 16 80.00% 14 70,00% 12 60,00% 10 50,00% 8 Speedup Máximo 40,00% 6 30.00% ■ Speedup Alcançado 4 20.00% 10.00% 0.00% 1 Nodo x 1 2 Nodos x 1 4 Nodos x 1 8 Nodos x 1 16 Nodos x 1

Figura 6: Desempenho e eficiência em arquitetura distribuída monoprocessada

## Execução em grade de computadores multicore

Para a avaliação de desempenho do algoritmo em grades de computadores multiprocessados, buscou-se a variação tanto na quantidade de nodos, quanto na quantidade de núcleos ativos por nodo. Dessa forma, a avaliação considerou tanto o desempenho pela distribuição quanto pelo compartilhamento de recursos dos computadores multiprocessados.

De acordo com o gráfico A apresentado na Figura 7, o *speedup* obtido com a paralelização foi satisfatório. Para uma melhor visualização, apresenta-se o gráfico B da Figura 7, em que a eficiência é representada no eixo

vertical e a variação na quantidade de núcleos no eixo horizontal. Por estar utilizando a arquitetura distribuída associada com a arquitetura *dual core*, cada nodo utiliza dois núcleos.

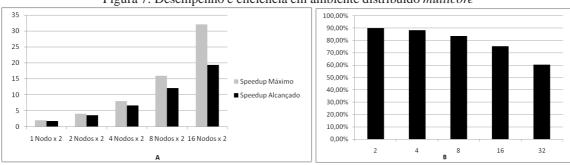


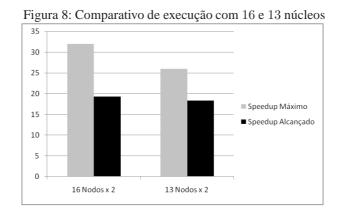
Figura 7: Desempenho e eficiência em ambiente distribuído multicore

Os resultados da execução com 32 núcleos processadores indicaram a necessidade de uma análise detalhada da execução. Essa análise possibilitou identificar que na distribuição das tarefas, o aumento na quantidade de nodos nem sempre impacta diretamente no tempo de execução, isso pode ser visualizado no gráfico da Figura 8, no qual as execuções com 13 e 16 nodos, apresentaram tempos de execução muito próximos, sendo utilizado, em ambos, 2 núcleos de processadores.

Os valores de eficiência na execução sobre grades de 13 e 16 nodos resultaram em 71% e 60% de eficiência, respectivamente. A relação estabelecida entre o número de processos disponíveis para execução e o número de processadores disponíveis determina um parâmetro que permite identificar a melhor quantidade de nodos para execução da tarefa. Por meio deste controle, otimiza-se a distribuição e a quantidade de nodos para execução de tarefas, deixando os demais nodos disponíveis para a grade e, ainda, não impactando fortemente no tempo de execução da tarefa.

#### 8 Conclusão

A principal contribuição do sistema  $SisA^3$  consistiu na concepção, modelagem e implementação de uma metodologia científica para determinação do volume em superfícies irregulares, formadas por produtos estocados em armazéns graneleiros. A utilização de *splines* polinomiais cúbicas no protótipo *iCone* possibilitou uma maior aproximação na modelagem do relevo real, a partir dos pontos da matriz de entrada.



Na continuidade, pretende-se desenvolver soluções tecnológicas para a área de sensoriamento, pela qual serão adquiridos os parâmetros de entrada, incluindo envio e acesso de resultados aos diversos setores empresariais e a geração dinâmica de processos paralelos no protótipo *p-iCone*.

#### Referências

- [1] AL-ALAM, W. G. *Uma proposta computacional de sistema automatizado de auditoria em armazéns de granéis baseada em metodologia científica*. Dissertação de mestrado CC/UCPel, Pelotas-RS, 2010.
- [2] BARTELS, R. H.; BEATTY, J. C.; and BARSKY, B. A. *Introduction to splines in computer graphics and geometric modeling*. Morgan Kaufmann Publishers, INC., 1987.
- [3] CHAROENPONG, T.; CHAMNONGTHAI, K.; KAMHOM, P.; and KRAIRIKSH, M. Volume measurement of mango by using 2d ellipse model. *Tecnical Report*, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand, 2004.
- [4] FASOUNAKI, P. Development and validation of a model for granular material volume measurements. PhD thesis, University of Nebraska Lincoln, 2012.
- [5] FOLEY, J. D. Computer graphics: principles and practice. Addison Wesley, NY, 1990.
- [6] FONSECA, V. S. *Vird-gm: uma contribuição para o modelo de distribuição e paralelismo do projeto D-GM.* Dissertação de mestrado CC/UCPel, Pelotas-RS, 2008.
- [7] KIREHNER, F. F.; FILHO, A. F.; SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S.and MITISHITA, E. A. O uso de funções splines no cálculo de volume de árvores. TR, *Revista Floresta*, 1989.
- [8] KREYSZIG, E. Advanced Engeneering Mathematics. John Wiley and Sons, NY, 1993.
- [9] LI, D. (Ed.) Computer And Computing Technologies In Agriculture, v. I, First IFIP TC 12 International Conference on Computer and Computing Technologies in Agriculture (CCTA 2007), Wuyishan, China, August 18-20, 2007, volume 258 of IFIP Advances in Information and Communication Technology. Springer, 2008.
- [10] LIN, Y.; and FU, Y. The key of bulk warehouse grain quantity recognition. In LI [9], pages 543-551.
- [11] LIN, Y.; and JIANG, X. The research on grain reserve intelligent audit method and implementation in three-dimensional stores. In LI [9], pages 525-532.
- [12] MUNHOZ, F. N. Expandindo o vird-gm para suporte a novos construtores do modelo D-GM. Monografia (Graduação em Ciência da Computação), UCPel, Pelotas-RS, 2008.
- [13] POV-Ray. Pov-ray 3.6 documentation online view, 2008. Disponível em: <a href="http://www.povray.org/documentation/view/3.6.1/279/">http://www.povray.org/documentation/view/3.6.1/279/</a>. Acesso em: 20 abr. 2014.
- [14] SILVA, L. K. M. Um sistema de modelagem geométrica usando splines. *Relatório Técnico*, Universidade Católica de Pernambuco, Recife/PE, 2007.