

# Integração de modelagem tridimensional, visualização científica e realidade virtual com aplicação em subestações de energia elétrica

## Integration of three-dimensional modelling, scientific visualization and virtual reality applied to electric power substations

Tiago Martinuzzi Buriol<sup>1</sup>

Sérgio Scheer<sup>1</sup>

<sup>1</sup>CESEC/UFPR – Centro de Estudos de Engenharia Civil – Universidade Federal do Paraná

tiagoburiol@gmail.com  
scheer@ufpr.br

**Abstract:** The Virtual Reality technology (VR) is considered the most advanced human / computer interface ever known, with applications in several fields of science and engineering. In the energy sector, research has been carried out aiming at applying this technology in planning, training and simulation activities. In this work a few possible VR applications related to power substations are presented. Aspects of modelling, navigation, and scientific visualization are addressed. In addition, an application for the visualization of illuminance fields is presented.

**Keywords:** Power substations, illumination, scientific visualization, virtual reality.

**Resumo:** A tecnologia de Realidade Virtual (RV) é considerada a mais avançada interface humano/computador conhecida, possuindo aplicações nos vários ramos da ciência e da engenharia. No setor de energia, pesquisas têm sido realizadas com a finalidade de aplicar essa tecnologia em atividades como de planejamento, treinamentos e simulações. Neste trabalho apresentam-se algumas possibilidades existentes para a aplicação de RV em atividades de uma subestação de energia elétrica.

Aspectos relativos à modelagem, navegação, e visualização científica são abordados. Além disso, uma aplicação para visualização de campos de iluminâncias é apresentada.

**Palavras-Chave:** Subestações, iluminação, visualização científica, realidade virtual.

### 1 Introdução

O uso de Realidade Virtual (RV) representa um paradigma de grande potencial no que diz respeito a interfaces para sistemas gráficos tridimensionais (3D) e interativos. Proporciona aplicações nos vários ramos da ciência e da engenharia. Sistemas de RV têm sido utilizados com diversas finalidades (revisão de projeto, robótica, treinamento, simulações, dentre outras), e beneficiado importantes empresas na área petrolífera, de energia, aeronáutica e automobilística. Novas aplicações para essa tecnologia dependem essencialmente da criatividade de seus desenvolvedores [1].

No setor de energia, o potencial da utilização de ambientes de RV, apesar de ainda pouco explorado, não é novidade. O trabalho de Breen e Scott [2] cita aplicações dessa tecnologia com objetivo de reduzir custos e aumentar a produtividade em atividades como projeto e manutenção de plantas, subestações e linhas de transmissão. Nos trabalhos [3], [4], [5] e [6] são apresentadas aplicações para treinamento e/ou aprendizado de operações em sistemas de energia que, por fazerem uso de RV, eliminam riscos inerentes a essas atividades em processos de capacitação. Em [7] é descrito o desenvolvimento de ferramentas de software para análise, simulação e manutenção de sistemas de potência que integram processamento numérico, banco de dados e ambientes virtuais. Já o artigo de de Geus e Dometerco [8] cita uma aplicação para a visualização 3D de dados de tensão em linhas de transmissão associados a um sistema de geoprocessamento. E finalmente em [9] é apresentado um aplicativo que usa um modelo digital como interface 3D para acessar informações armazenadas em banco de dados sobre equipamentos de uma subestação.

Modelos digitais de engenharia, como os provenientes de sistemas do tipo *Computer Aided Design* (CAD), podem ser convertidos para outros formatos digitais, como o *Virtual Reality Modeling Language* (VRML<sup>1</sup>), e visualizados em sistemas de RV, o que provê ao usuário a possibilidade de “navegar” no modelo 3D obtendo a sensação de imersão, ou seja, estar “dentro” do ambiente virtual.

Utilizando técnicas de Visualização Científica (VC), é possível visualizar dados de grandezas físicas diversas (campos elétricos e magnéticos,

<sup>1</sup> < <http://www.web3d.org/x3d/specifications/#vrml97> >

iluminâncias, etc) por meio de algoritmos para campos escalares e vetoriais [10]. Esses dados podem ser resultados de simulações numéricas como pelo Método dos Elementos Finitos (MEF), por exemplo, [11] e [12].

A navegação e visualização de dados em 3D aumenta a capacidade do usuário de extrair informações relevantes sobre grandes modelos e/ou conjuntos de dados. A visualização combinada de modelos CAD com dados resultantes de análises numéricas pode melhorar a compreensão desses dados, podendo também reduzir custos de projeto e auxiliar na tomada de decisões.

Por exemplo, a visualização de campos eletromagnéticos pode auxiliar no planejamento de atividades de transporte de equipamentos em subestações de energia elétrica, uma vez que restrições devidas à atuação desses campos podem resultar em danos e interrupção do fornecimento de energia e conseqüentes multas. Outro exemplo é a visualização de campos de iluminâncias como auxílio no planejamento de sistemas de iluminação. Uma iluminação adequada em subestações de energia melhora as condições de trabalho e pode diminuir riscos de acidentes e consumo de energia. Esses exemplos são casos de visualização de campos de dados vetoriais e escalares respectivamente.

Nesse sentido, este trabalho apresenta aspectos acerca da utilização de RV integrada com modelagem tridimensional em sistemas CAD e a técnicas de VC em atividades voltadas a subestações de energia. São relatadas algumas possibilidades e limitações. Também é apresentada uma aplicação de visualização de campos escalares, útil na concepção e estudo de projetos de iluminação.

## 2 Aplicações de RV em atividades em subestações de energia elétrica

Além da simples navegação no modelo, algumas funcionalidades desejáveis em um sistema de RV aplicado a atividades em subestações de energia são: a movimentação de equipamentos para o planejamento de transporte de cargas; acesso a informações em base de dados; planejamento do sistema de iluminação; e visualização dos campos eletromagnéticos atuantes.

Nesta seção apresentam-se alguns aspectos relacionados à implementação de funções para navegação e visualização de dados escalares.

### 2.1 Visualização de grandes modelos CAD

A visualização de grandes modelos geométricos, provenientes de software CAD, em sistemas de RV é interesse de empresas e tema de trabalhos e pesquisas em todo o mundo, como pode ser observado nos trabalhos [13],

[14] e [15]. O impacto visual e o caráter imersivo proporcionado pela tecnologia da RV atraem a atenção de seus usuários e melhoram a percepção do conteúdo 3D em estudo.

Alguns sistemas CAD permitem a conversão direta para o formato VRML, padrão ISO para transferência de conteúdo 3D na web, como por exemplo, as ferramentas de software Microstation (Bentley) e Solidworks (Solidworks). Porém outros, como o AutoCAD 2006 (Autodesk), não realizam a exportação de seus arquivos para VRML, fazendo-se necessária para tal a utilização de outro programa, como o 3D Studio Max (Discreet), em um processo intermediário.

Além da criação do modelo em sistemas do tipo CAD, também existem as tecnologias de aquisição de dados, como o *Laser Scanning*, que são capazes de gerar rápida e precisamente modelos digitais 3D complexos de plantas industriais ou edificações já construídas, o que aumenta a demanda de tecnologias de visualização. Equipamentos de varredura a laser geralmente integram-se a algum sistema CAD gerando a "saída" nesse formato.

Depois de realizada a conversão para o formato VRML, é possível "navegar" no modelo interativamente, de forma exploratória, utilizando um programa interpretador que pode ser um *plug-in* para um navegador (ou *browser*) de Internet ou compatível com VRML. Muitos *plug-ins* e *browsers* estão disponíveis gratuitamente na web, alguns exemplos são o Octaga<sup>2</sup> e o Cortona<sup>3</sup>.

Cabe colocar que uma vantagem em se usar o VRML, ou seu sucessor, versão que usa codificação XML (*eXtensible Markup Language*), o X3D<sup>4</sup> (*eXtensible 3D*), é a facilidade de transferência e visualização dos arquivos 3D entre diferentes sistemas, o que melhora a comunicação e, conseqüentemente, a colaboração entre profissionais, e também permite a visualização do conteúdo com dispositivos especiais para visão estéreo.

Algumas dificuldades no processo de conversão de grandes modelos CAD para formatos compatíveis com a tecnologia de RV são descritas no trabalho de Corseuil et al [15]. Dentre elas estão: a falta de suporte à utilização de texturas, encontrada na maioria dos sistemas CAD; o alto detalhamento das geometrias dos modelos CAD, o que resulta em um baixo desempenho (*frame rate*) na visualização em RV; e o inadequado tratamento de superfícies curvas complexas, como as NURBS (*NonUniform Rational B-Splines*).

<sup>2</sup> <<http://www.octaga.com/>>

<sup>3</sup> <<http://www.parallelgraphics.com/products/cortona/>>

<sup>4</sup> <<http://www.web3d.org>>

## 2.2 Planejamento do Sistema de Iluminação e visualização de campos de iluminâncias

Um sistema de RV pode reunir funcionalidades para projetar um sistema de iluminação, processar cálculos luminotécnicos e prover a visualização dos resultados no ambiente virtual em que está inserido o modelo geométrico. Isso possibilita que se realizem, de forma ágil, diferentes simulações e se façam comparações a fim de realizar a melhor escolha para um projeto.

Um método comumente utilizado em cálculo luminotécnico é o método ponto-a-ponto, ou método das iluminâncias. Com ele é possível calcular a iluminância resultante em cada ponto de interesse, ou em uma malha de pontos, e traçar as curvas *isolux* em um plano de trabalho [16]. Esse método geralmente requer o uso de aplicativos computacionais para gerar os valores de iluminância em malhas 2D ou 3D definidas em um espaço 3D. Técnicas de VC podem ser usadas para representar graficamente esses dados de forma a promover um ganho em sua compreensão.

De fato, nos últimos anos grandes, empresas do setor de materiais de iluminação vêm investindo na elaboração de programas computacionais de qualidade, voltados para projetos de iluminação. Muitas dessas ferramentas, como o DIALux<sup>5</sup> e o Calculux<sup>6</sup>, são de distribuição gratuita e se mostram à altura de renomados programas comerciais. Esses programas fazem uso de bases de dados, contendo curvas fotométricas digitalizadas em padrões internacionais, de produtos (lâmpadas e luminárias) de diversos fabricantes.

No entanto, segundo Marinoski [17], no cenário nacional, os profissionais do ramo ainda têm pouco conhecimento e prática na aplicação dessas ferramentas. Esse fato pode ser atribuído à dificuldade de aprendizado e de utilização dos aplicativos ou à impossibilidade de sua integração com sistemas do tipo CAD ou RV, por exemplo. Também vale colocar que esses programas não provêm uma visualização 3D interativa e simultânea dos campos de iluminância e do modelo geométrico.

No caso específico da empresa brasileira de energia elétrica relacionada ao estudo aqui relatado, os projetos de iluminação das subestações eram realizados sem a utilização de uma ferramenta de software específica. O processo demandava grande esforço e tempo, e não fornecia uma visualização 3D dos resultados. Em linhas gerais, os cálculos eram realizados com auxílio de planilhas eletrônicas e a representação dos resultados era feita mediante diagramas bidimensionais e relatórios.

O método ponto-a-ponto, utilizado por essa empresa, requer o conhecimento de

informações fotométricas sobre as fontes de luz utilizadas no projeto. Essas informações são geralmente fornecidas pelo fabricante por meio de gráficos nos catálogos dos produtos. Desse modo, o projetista precisava consultar os catálogos inúmeras vezes, de forma exaustiva.

No entanto, existem formatos digitais padronizados, como o padrão IES<sup>7</sup> (*Illuminating Engineering Society*), para transferência de informações fotométricas de fontes de luz. Isso torna possível que a obtenção da intensidade luminosa emitida em cada direção por uma determinada fonte de luz seja realizada automaticamente e computada diretamente no algoritmo de cálculo.

Ao lado dos sistemas de RV, ferramentas para VC, como o VTK<sup>8</sup> (*Visualization ToolKit*), podem ser utilizadas gratuitamente no desenvolvimento de aplicativos gráficos para a visualização de campos escalares e vetoriais. A ferramenta VTK dispõe de diversos algoritmos para visualização, como de mapeamento de cores e extração de geometrias, além realizar a conversão entre diferentes formatos, inclusive VRML.

Utilizando os padrões IES e VRML e a ferramenta VTK é possível desenvolver algoritmos para processar campos de iluminância para qualquer projeto de iluminação e visualizar os resultados juntamente com modelos geométricos em um ambiente virtual 3D.

## 2.3 Visualização de Campos Eletromagnéticos

Existe uma preocupação, tanto das empresas de energia e telecomunicações quanto dos órgãos de saúde, com questões relativas à influência dos campos elétricos e magnéticos nos seres vivos. Onde existir corrente elétrica haverá campos eletromagnéticos. Os trabalhadores do setor elétrico, operadores de radar, rádio, ondas curtas, microondas e telefonia celular estão expostos aos seus efeitos.

Os campos eletromagnéticos de alta frequência, produzidos por correntes elétricas de linhas de transmissão e de distribuição, são potencialmente perigosos. Trabalhadores em unidades desse tipo sofrem longos períodos de exposição, situação que pode provocar danos a sua saúde e prejuízo à empresa. Considerando que, segundo o Ministério do Trabalho e do Emprego [18], em 2001 o maior volume de trabalhadores concentrou-se na distribuição de energia elétrica, eventuais acidentes podem assumir grandes proporções.

Além disso, como também pode ser visto em [18], riscos atribuídos à ação de campos eletromagnéticos são relacionados também à

<sup>5</sup> <<http://www.dialux.com/>>

<sup>6</sup> <<http://www.lightingsoftware.philips.com/>>

<sup>7</sup> <<http://www.iesna.org>>

<sup>8</sup> <<http://www.vtk.org>>

possibilidade de ocorrências de curtos-circuitos ou mau funcionamento do sistema elétrico, originando incêndios, explosões ou acidentes ampliados.

A análise computacional da distribuição de campos eletromagnéticos é comumente realizada por meio de métodos numéricos como o Método dos Elementos Finitos. Nesse tipo de análise, a visualização dos dados constitui um passo muito importante. No entanto, os métodos de visualização não têm explorado totalmente a extraordinária evolução da computação gráfica. Isso se dá devido a fatores como: dificuldades específicas das linguagens de programação, concentração de esforços dispensada na obtenção dos dados e não na exploração das possibilidades de visualização, além do alto custo de um bom pacote de software comercial, como constatou Pavão et al [19].

Exemplos de trabalhos descrevendo a utilização de RV para visualização de campos eletromagnéticos são descritos em [20] e [21].

### 3 Visualização Científica: conceitos, técnicas e ferramentas

A Visualização Científica é a área da computação dedicada à visualização de dados físicos, ou científicos, geralmente provenientes de medições ou simulações numéricas [22], [23] e [24]. Técnicas de VC são utilizadas no pós-processamento de análises numéricas com objetivo de proporcionar um ganho na compreensão dos dados resultantes. Nesse contexto, ambientes imersivos e sistemas de RV são considerados formas avançadas de interface para visualização [25, 26].

Técnicas e ferramentas de VC são usadas na geração das geometrias para a representação de dados como campos escalares e vetoriais. Esses dados podem ser visualizados simultaneamente a modelos geométricos de engenharia, tais como peças, equipamentos e edificações.

Nesta seção, apresentam-se alguns conceitos básicos e técnicas de visualização científica. Em seguida descrevem-se aspectos relativos à ferramenta VTK, utilizada no desenvolvimento da aplicação para simulação da iluminação em uma subestação de energia apresentada na seção 4.

#### 3.1 Visualização Científica de campos 3D

De um modo simplificado, a visualização é a transformação de dados ou informações em figuras, estimulando assim, o principal sentido humano, a visão [24].

Visualização Científica é a aplicação desse processo na visualização de dados científicos [27]. O objetivo da VC é promover um nível mais profundo de entendimento dos dados sob

investigação, confiando na habilidade poderosa dos humanos em visualizar [28].

Assim, técnicas e ferramentas de visualização têm sido usadas para analisar e mostrar grandes volumes de dados multidimensionais, freqüentemente variantes no tempo, de modo a permitir ao usuário extrair características e resultados rápida e facilmente.

Uma forma de classificar as diferentes tecnologias de visualização de dados é examinar o contexto no qual eles estão inseridos. Se os dados estão no mesmo “espaço-tempo” da natureza, ou seja, no espaço 3D mais a dimensão “tempo”, então tipicamente são usadas técnicas de VC. Se os dados existem em um espaço com muitas dimensões, ou em espaços abstratos, métodos de visualização de informações são utilizados [24].

Pode-se dizer que a VC é uma forma de comunicação computacional que consiste na transformação de dados, estáticos ou variantes no tempo, em representações que reflitam a informação neles contida, de forma eficiente e precisa. Sua importância está relacionada à evolução ocorrida nas tecnologias e sistemas de aquisição de dados (simulações numéricas, sensores, etc), que possibilitam cientistas e engenheiros produzirem enormes conjuntos de dados.

Outras definições formais para VC podem ser encontradas. Para McCormick et al [22], VC é o uso de CG) para criar imagens visuais que ajudam na compreensão de conceitos científicos ou resultados complexos, freqüentemente associados a representações numéricas volumosas. Wolff [29], de forma muito parecida, escreveu que VC é a utilização de técnicas de CG e de processamento de imagens, para representar um conjunto de dados visualmente.

Segundo Globus e Raible [30], a VC também pode ser usada para produzir bonitas imagens mas que nem sempre são efetivamente capazes de transmitir informações científicas relevantes. A omissão de escala de cores e suavização de geometrias, por exemplo, podem levar uma imagem a não dizer nada cientificamente.

Diferentes técnicas de VC podem ser mais ou menos convenientes, dependendo da natureza dos dados a serem representados (número de variáveis dependentes) e da dimensão do domínio em que se encontram (número de variáveis independentes). Por exemplo, para visualização de campos de escalares definidos em um espaço 3D, podem ser usadas técnicas de extração de superfícies de nível ou então *rendering* direto de volumes. Já para visualização de campos vetoriais em 3D, técnicas como *streamlines*, baseadas em texturas ou em ícones, podem ser mais adequadas.

O autor Souza [23] escreveu que a forma mais utilizada para visualização de campos escalares

é o *rendering* volumétrico. No entanto, são as técnicas de reconstrução de superfícies que se adaptam melhor às filosofias de interação, presentes nos ambientes virtuais como aqueles utilizados em RV.

A visualização computacional 3D de campos escalares, vetoriais e tensoriais representa uma poderosa ferramenta de apoio na análise e compreensão de grandes conjuntos de dados. No entanto, a tecnologia envolvida nos sistemas de visualização encontra-se atualmente atrás das tecnologias de obtenção de dados, em uma escala crescente de evolução, fazendo com que em alguns casos, sejam gastos muitos dias para compreender conjuntos de dados obtidos em poucas horas [31].

O processo de visualização de dados passa necessariamente por três passos fundamentais, que são: a aquisição dos dados, a transformação em uma forma apropriada para representação, e a “renderização” (*rendering*) ou representação na tela do monitor de vídeo (ou em outro *display*). As técnicas de visualização envolvem, portanto, algoritmos de processamento de dados, que extraem os dados de interesse da amostra e os convertem em uma forma adequada para representação.

Exemplos das muitas técnicas de VC existentes são mapeamento de cores, isocontornos, linhas de fluxo e representação volumétrica. Algumas podem ser mais adequadas que outras, dependendo do tipo dos dados a serem representados. Dados escalares (temperatura, pressão, etc), vetoriais (velocidade, campo magnético, etc) e tensoriais (tensor de tensões, tensor de difusão, etc), podem estar definidos em um espaço 1D, 2D ou 3D, e ainda ser estáticos ou variantes no tempo.

Uma forma de fazer distinção entre as técnicas de VC é separá-las conforme o tipo de dados e também conforme a dimensão das primitivas usadas para representar os dados: pontos, linhas, superfícies e volumes [32].

Nessa segunda categoria, a representação de superfícies é geralmente feita por meio da representação geométrica de uma malha de polígonos conectados. Em placas gráficas aceleradoras 3D são utilizados triângulos, e a quantidade máxima de triângulos mostrados em uma imagem é usada para avaliar o desempenho desse tipo de hardware.

Ainda nas técnicas classificadas em função da dimensão das primitivas, na representação de volumes, os dados são tratados como uma matriz de elementos de volume chamados *voxels*. O *voxel* é a representação de uma vizinhança espacial, sobre a qual determinados atributos e características são associados. A técnica de representar diretamente dados volumétricos, ou seja, sem requerer nenhum tratamento intermediário, é chamada *direct volume rendering*.

Na seção 3.2, são descritas algumas técnicas de representação de dados escalares 2D e 3D e alguns conceitos relacionados. Na seção 3.3 são apresentados aspectos sobre a ferramenta VTK utilizada no desenvolvimento da aplicação apresentada na seção 4.

## 3.2 Visualização de Campos Escalares

Um escalar é um componente que assume um único valor de uma escala, por exemplo, temperatura. Um campo de escalares é um arranjo de valores escalares distribuídos em um espaço 1D, 2D ou 3D.

Algumas técnicas de visualização associam os valores escalares a uma dimensão adicional, fazendo com que a representação gráfica tenha uma dimensão a mais que o espaço no qual os dados estão contidos. Por exemplo, um campo de escalares 1D pode ser representado por uma curva plana 2D. Um campo de escalares 2D pode ser representado como uma superfície no espaço 3D. Outras técnicas associam valores de uma escala de cores aos escalares, mantendo assim a dimensão do espaço em que os dados estão dispostos.

Algumas vezes deseja-se visualizar o interior de um volume de dados, ou seja, um conjunto de dados dispostos sobre nós de uma malha 3D. A visualização de dados volumétricos pode envolver algoritmos e técnicas, como por exemplo, o *rendering* direto de volumes mapeados com diferentes níveis de opacidade. Também é usual a extração de geometrias definindo os chamados isocontornos. São exemplos de isocontornos as isolinhas (caso 2D) e as isossuperfícies (caso 3D). O mapeamento de cores é utilizado tanto em *rendering* de superfícies quanto de volumes.

### 3.2.1 Campos escalares 2D

Entre as formas de representar escalares, a mais óbvia é por meio de cores. A técnica de mapeamento por cores consiste na associação de cores a valores numéricos escalares. Os modelos RGB (*Red, Green, Blue*, ou vermelho, verde e azul) e HSV (*Hue, Saturation, Value*, ou matiz, saturação e intensidade) podem ser usados para definição da escala de cores [19] [27].

Uma maneira de inserir as cores na representação por superfícies é indexar as cores aos vértices, ou seja, diretamente nos pontos que contêm os dados. Outra forma é mediante mapeamento de texturas, o que proporciona um ganho de desempenho na renderização. No caso de renderização direta de volumes, as cores são aplicadas às células (*voxels*).

Na Figura 1, à esquerda, tem-se a ilustração de duas técnicas de representação de campos escalares em uma mesma imagem. Os dados

originais consistem em valores escalares definidos sobre um plano e estão representados por meio de uma superfície elevada (3D), ou *heigh map*, e de mapeamento de cores, ou *color map*, no plano horizontal (2D). Na Figura 1 à direita, é representada a técnica de extração de isolinhas, que consiste em traçar curvas passando pelos pontos de igual valor.

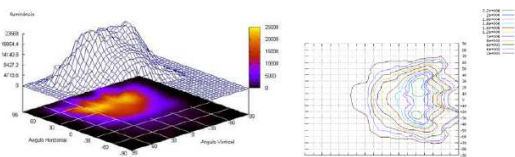


Figura 1: Visualização de campos escalares 2D.

No caso da amostra de dados ser volumétrica o mapeamento de cores pode ser feito na superfície externa, nas células (*voxels*), ou então, em planos de corte (*slices*), que corresponde ao mapeamento de cores em planos (2D).

### 3.2.2 Campos escalares 3D

No caso 3D a visualização do interior da amostra pode ser feita por meio da extração de isossuperfícies, *rendering* direto de volume ou utilizando planos de corte (*slices*) somado a técnicas para campos escalares 2D.

A renderização de superfícies, como já foi dito, apresenta melhor desempenho frente à renderização direta de volumes sendo mais adequada para utilização em sistemas de *rendering* em tempo real. Isso se dá pelo fato de que o algoritmo de *Z-Buffer* utilizado é um dos mais flexíveis para o tratamento de visibilidade de modelos poligonais, sendo implementado por bibliotecas gráficas como OpenGL<sup>9</sup> e DirectX<sup>10</sup> e cujas funções podem ser aceleradas em uma placa gráfica.

Dessa forma, a utilização de isossuperfícies pode ser a solução mais adequada para visualização de campos escalares 3D em sistemas interativos. Na figura 2, à esquerda, é ilustrada a representação por *rendering* direto de volume e, à direita, por isossuperfícies.

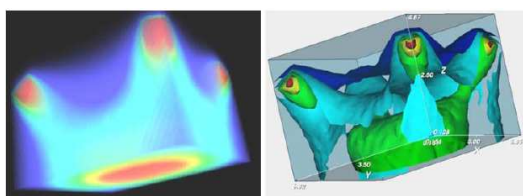


Figura 2: Visualização de campos escalares 3D.

Em *rendering* de superfícies, o mapeamento de cores pode ser feito aplicando as cores aos vértices dos polígonos (*index color*), geralmente triângulos, que formam as superfícies. No

entanto o uso de *index color* é limitado, sendo o mapeamento de textura a melhor maneira de atribuir cores aos valores escalares.

Planos de corte atravessam o volume de dados e apresentam (por mapeamento de cores, isolinhas, etc.) os valores escalares “sobre os planos”. O volume de dados a ser visualizado não é contínuo. Por essa razão, ao gerar os planos, freqüentemente são utilizadas interpolações.

Dentre os algoritmos de visualização de dados volumétricos por superfícies, destacam-se conexão de contornos (*boundary tessellation*) e cubos marchantes (*marching cubes*) [33]. As vantagens dessa técnica são a velocidade para a geração e exibição da imagem final e o pouco espaço de armazenamento requerido. Representações desse tipo são apropriadas quando existem isossuperfícies bem definidas nos dados, mas não são eficientes quando o volume é composto por muitas microestruturas, tais como os tecidos humanos em muitas imagens médicas.

Na visualização direta de volumes, os dados são representados por *voxels*, análogo 3D do *pixel*, e são projetados diretamente em pixels 2D armazenados como uma imagem, dispensando o uso de primitivas geométricas [33]. Em outras palavras, os dados escalares são classificados a partir de uma função de transferência, que mapeia valores do campo escalar 3D em cor e opacidade, para serem visualizados na tela 2D [34].

Alguns algoritmos envolvidos na renderização direta de volumes são *ray casting* [35], *splatting* [36] e [37], *shear-warp* [38], *shell rendering* [39], *cell-projection* [40] e *V-Buffer* [41].

Recentemente, tem-se popularizado o uso de mapeamento de textura 3D por hardware para a visualização de volumes. Uma estratégia adotada para possibilitar a visualização interativa de volumes é a utilização de hardware dedicado.

### 3.3 O Visualization Toolkit

O Visualization Toolkit é uma ferramenta de código aberto para computação gráfica 3D, processamento de imagens e visualização, usado por milhares de pesquisadores e cientistas em todo o mundo, inclusive no desenvolvimento de aplicações comerciais [24]. Consiste numa biblioteca de classes em C++ e várias camadas de interfaces interpretadas, incluindo Tcl/Tk, Java, e Python. Suporta uma ampla variedade de algoritmos de visualização para diferentes tipos de dados. Também são implementadas técnicas de modelagem avançadas como modelagem implícita, redução de polígonos, suavização de malhas e triangulação de Delaunay [42].

<sup>9</sup> <<http://www.opengl.org>>

<sup>10</sup> <<http://www.microsoft.com/windows/directx>>

O projeto e implementação da biblioteca foram fortemente influenciados pelos princípios de orientação a objetos, e o software já foi instalado e testado em praticamente todas as plataformas baseadas em Unix e Windows. O VTK pode ser obtido mediante *download* no site [www.vtk.org](http://www.vtk.org) ou então por meio do CD que acompanha o livro, escrito pelos seus desenvolvedores, que descreve sua arquitetura e funcionamento, referido em [24].

VTK provê uma variedade de representações de dados incluindo conjuntos de pontos desestruturados, dados poligonais, imagens, volumes, e também malhas estruturadas, retilíneas e não-estruturadas. VTK possui leitores/importadores e escritores/exportadores para trabalhar com dados de diferentes aplicações. O modelo de renderização do VTK suporta as abordagens 2D, poligonal, volumétrica e baseada em texturas que podem ser usadas de forma combinada [24].

O VTK possui dois subsistemas principais: o modelo gráfico e o pipeline de visualização. O modelo gráfico (ilustrado na Figura 9) forma uma camada abstrata sobre a biblioteca gráfica OpenGL, assegurando a portabilidade entre plataformas.

Os nomes das classes no modelo gráfico foram adaptadas da indústria cinematográfica, por exemplo, luzes, câmeras e atores. Essas e outras classes são instanciadas pelo usuário para criar uma cena. São sete classes básicas para a renderização de uma cena: *vtkRenderWindow*, *vtkRenderer*, *vtkLight*, *vtkCamera*, *vtkActor*, *vtkProperty* e *vtkMapper* [24].

O *pipeline* de processamento transforma os dados em formas que podem ser mostradas no subsistema gráfico. Por exemplo, pode-se ler uma nuvem de pontos desorganizados, criar uma malha via triangulação de Delaunay, e mostrar a malha usando renderização de superfícies em uma janela.

O *pipeline* é construído pela conexão de objetos de dados e filtros (*SetInput/GetOutput*). Os objetos de dados provêm acesso aos dados e os filtros realizam operações sobre esses dados.

Conjunto de dados, ou *Data Sets*, são uma especialização de objetos de dados possuindo estruturas geométrica e topológica, e também atributos associados em conformidade com sua geometria e/ou topologia. Os objetos de processos, comumente chamados de filtros, no VTK podem ser classificados em três categorias diferentes: *sources*, *filters* e *mappers*. As fontes (*sources*) não admitem entradas (*Inputs*), apenas saídas (*Outputs*); os filtros (*filters*) admitem uma ou mais entradas e uma ou mais saídas; e os mapeadores (*mappers*) finalizam o *pipeline* acoplando-se ao modelo gráfico.

O VTK possui um conjunto de rotinas capazes de ler e escrever os formatos mais populares de arquivos de dados, oferecendo assim uma forma simples para viabilizar a transição de dados entre diferentes ferramentas de software. O VTK também possui seus próprios formatos de arquivos, a saber, o Legacy e o formato baseado em XML. O Legacy é mais simples, podendo ser facilmente escrito tanto manualmente quanto via programação. O formato baseado em XML é mais flexível, suporta o acesso aleatório, entrada e saída de sistemas paralelos e tem maior capacidade de compressão.

O formato de arquivo Legacy do VTK consiste em cinco partes básicas: cabeçalho, título, definição do tipo de dados (ASCII ou binário), definição da geometria/topologia (pontos estruturados, malha não estruturada, etc.), e finalmente os atributos do conjunto de dados, que podem consistir, por exemplo, de uma lista de valores escalares ou vetoriais.

O VTK suporta cinco diferentes estruturas de dados: pontos estruturados, grade (*grid*) estruturada, grade retilínea, grade não-estruturada e dados poligonais. Dados com topologia implícita (estruturados) variam recebendo acréscimo em *x*, depois em *y* e então em *z*.

Na aplicação desenvolvida durante este trabalho foram utilizadas malhas estruturadas, pois, dessa forma, torna-se possível gerar imagens a partir dos campos escalares 2D e, assim, permitir a visualização na forma de uma textura, o que promove um ganho no desempenho da visualização final.

Resultados de simulações numéricas, se armazenados em arquivos com o Formato Legacy, poderão ser facilmente interpretados por algoritmos que utilizam essa ferramenta. Maiores detalhes podem ser obtidos no trabalho de Schoeder [24].

#### 4 Uma aplicação para projetos de iluminação em subestações

Dentre os métodos utilizados em luminotécnica, o método ponto-a-ponto é o mais indicado no dimensionamento da iluminação direta em áreas externas [16]. Esse é o caso de uma subestação. Por meio desse método, obtém-se a iluminância realizada por uma ou mais fontes de luz em qualquer ponto desejado ou em uma malha de pontos.

Para aplicar o método ponto-a-ponto é preciso conhecer as características fotométricas de cada fonte de luz utilizada. Essas características são geralmente fornecidas pelos fabricantes em diferentes formas: tabelas, diagramas ou gráficos. A forma mais conveniente de entrar com dados fotométricos em um programa é por meio da utilização de arquivos em formatos padronizados como o *Illuminating Engineering*

Society (IES). No entanto, nem todos os fabricantes de luminárias possuem os dados dos seus produtos nesse formato.

Neste trabalho, para cada fonte de luz utilizada, os dados fotométricos que serão utilizados no cálculo estão contidos em um arquivo IES correspondente. Esse arquivo possui os dados da distribuição das intensidades luminosas de uma fonte de luz no formato que é padrão internacional para transferência de informações fotométricas digitalizadas. Também são necessárias as informações geométricas do sistema de iluminação, ou seja, o ponto  $L(X_L, Y_L, Z_L)$  em que cada luminária está localizada, o ponto  $D(X_D, Y_D, Z_D)$  para onde está focalizada e o(s) ponto(s)  $P(X_P, Y_P, Z_P)$  no qual se deseja saber a iluminância [16]. Dessa maneira, um programa para processar o método ponto-a-ponto deverá receber essas informações como entrada. A Figura 3 ilustra o esquema de montagem de uma luminária.

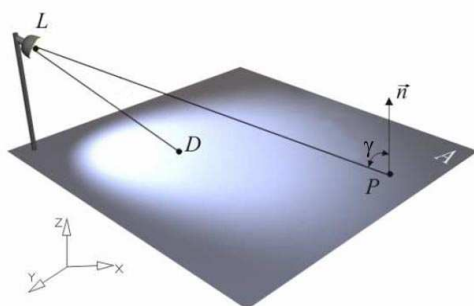


Figura 3: Esquema de montagem de uma luminária

Na Figura 3,  $\vec{n}$  é um vetor normal ao plano A, e  $\gamma$  é o ângulo entre o vetor  $\vec{n}$  e a reta LP. A iluminância  $E_{total}$  resultante em um ponto P sobre uma superfície qualquer é dada pela equação (1),

$$E_{total} = \sum_{i=1}^N E_i \quad (1)$$

Em (1), a iluminância  $E_i$  realizada por uma única fonte de luz  $i$  é dada pela equação (2).

$$E_i = \frac{I \cos \gamma}{d^2} \quad (2)$$

Na qual  $I$  é a intensidade luminosa emitida pela fonte de luz  $i$  na direção do ponto P e  $d$  é a distância LP.

No algoritmo numérico para o cálculo das iluminâncias desenvolvido durante este trabalho, chamado *ProcessalIES*, a entrada de dados é feita por meio de um arquivo no formato de texto ASCII contendo as informações sobre o sistema de iluminação projetado. As informações contidas nele são: as dimensões da malha estruturada (retilínea) que será gerada; o número de divisões em cada direção (x-y-z); a origem da malha; o número de fontes de luz

diferentes utilizadas no projeto; o número total de pontos de luz; a lista de arquivos IES das diferentes luminárias utilizadas; a lista das luminárias com a posição e orientação de cada uma; e o índice do arquivo IES correspondente. Um exemplo de arquivo de entrada é ilustrado na Figura 4.

```
20 10 0
100 50 10
0 0 0
2 2
SWF330_400KA_45_01xSON-T400WCON.ies
SWF330_400KSLxSON-T400WCON.ies
5 5 5 5.01 5 0 1
15 5 7 15.01 5 0 2
```

Figura 4: Exemplo de arquivo de entrada

Ao executar o programa *ProcessalIES*, os dados de entrada são lidos e são calculados, para cada ponto da malha, os parâmetros de entrada nas equações. As intensidades são obtidas por meio da leitura dos arquivos IES das luminárias utilizados no projeto. Os campos de iluminâncias resultantes são armazenados em arquivos no formato Legacy do VTK para, dessa forma, serem utilizados pelos algoritmos de visualização. O fluxo de dados é ilustrado na Figura 5.

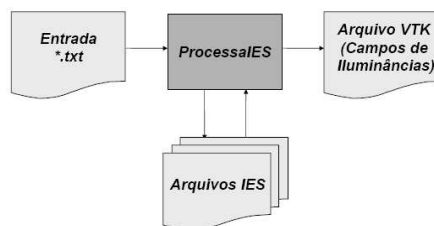


Figura 5: Fluxo de dados no algoritmo *ProcessalIES*.

Uma vez processado o campo de iluminâncias, em uma malha 2D ou 3D, os dados resultantes são visualizados por meio dos programas desenvolvidos utilizando a ferramenta VTK, denominados *ColorMap* (para o caso 2D) e *Isosup3D* (caso 3D). Esses algoritmos permitem obter a visualização por mapeamento de cores e extração de isossuperfícies, e também a conversão das geometrias geradas para o formato VRML. Dessa maneira, é possível inserir o modelo geométrico da subestação juntamente com as geometrias para visualização dos dados de iluminância, no mesmo ambiente virtual 3D. A Figura 6 ilustra o fluxo de dados no algoritmo *ColorMap*.

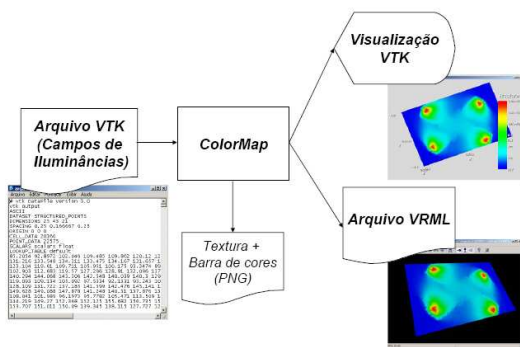


Figura 6: Fluxo de dados no algoritmo *ColorMap*.

A Figura 7 mostra o fluxo de dados no algoritmo *Isosup3D*.

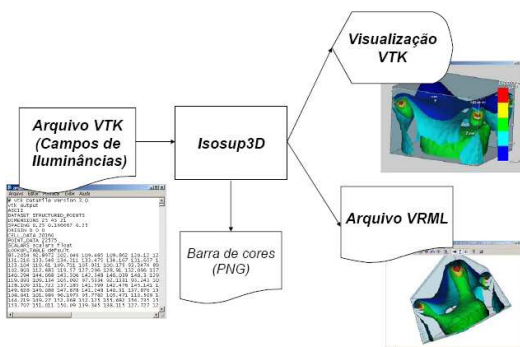


Figura 7: Fluxo de dados no algoritmo *Isosup3D*.

As Figuras 8 e 9 mostram o resultado da visualização dos campos de iluminâncias simultaneamente à visualização do modelo CAD de uma subestação de energia elétrica, em um ambiente virtual 3D escrito em VRML. A Figura 8 ilustra o caso 2D (projetado no piso) onde o campo de valores escalares de iluminâncias é visualizado por meio de mapeamento de cores.

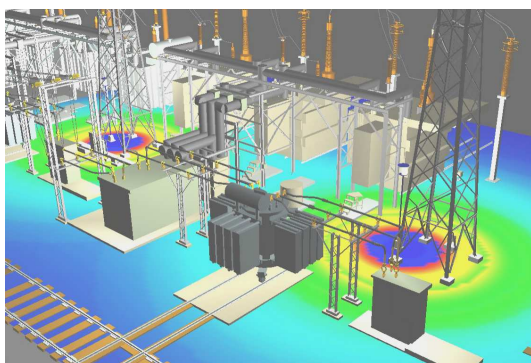


Figura 8: Visualização do modelo CAD e do campo 2D de iluminâncias, utilizando mapeamento de cores, simultaneamente em um ambiente virtual 3D.

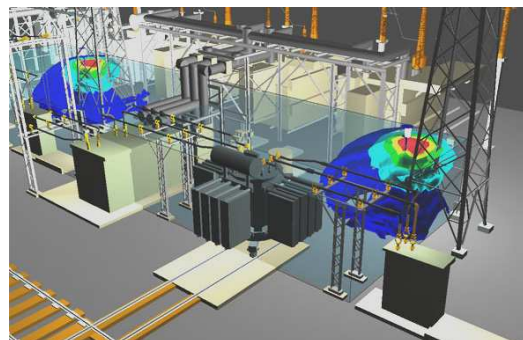


Figura 9: Visualização do modelo CAD e do campo 3D de iluminâncias, utilizando extração de isossuperfícies, simultaneamente em um ambiente virtual 3D.

## 5 Conclusões

O uso de RV em aplicações na indústria vem crescendo a cada dia e casos de sucesso vêm comprovando seu potencial. Novas aplicações tendem a surgir nas mais diversas áreas e a comprovação de sua praticabilidade será evidenciada naturalmente com o passar do tempo.

A aplicação desenvolvida abordada neste trabalho verificou não somente a possibilidade de uso de RV (utilizando da linguagem VRML) no planejamento de iluminação, mas também a combinação da visualização científica de campos de iluminâncias com a visualização do modelo digital 3D proveniente de sistemas CAD.

Concluiu-se que, utilizando a tecnologia da RV por meio da linguagem VRML, em combinação com ferramentas de VC como o VTK, é possível desenvolver algoritmos e/ou aplicativos, voltados à engenharia, capazes de prover uma visualização de dados 3D, interativa, na qual pode-se combinar VC com modelos CAD.

## 6 Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio prestado ao longo deste estudo pela empresa concessionária de energia e pelo LACTEC – Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento.

## 7 Referências

- [1] Burdea, G. e P. Coiffet. *Virtual Reality Technology*, Wiley Interscience, New Jersey, 2003.
- [2] Breen, P T e Scott, W G. *Virtual Reality Applications in T&D Engineering*. IEEE – Rural Electric Power Conference. 39. p.B5/1-B5/6. 1995.
- [3] Garant, E; Daigle, A; Desbiens, P; Okapuuvon Veh, A; Rizzi, J.-C; Shaikh, A; Gauthier, R; Malowany, A S; Marceau, R J. *A virtual reality training system for power-utility personnel*. IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers, and Signal Processing, 1995. p. 296 – 299.

- [4] Arroyo, E; Arcos, J L L. SRV: a virtual reality application to electrical substations operation training. IEEE International Conference on Multimedia Computing and Systems, 1999. v. 1, p. 835-839.
- [5] Tam, E K; Badra, F; Marceau, R J; Marin, M A; Malowany, A S. A Web-based virtual environment for operator training [for power systems]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999. V. 14, n. 3, p. 802-808.
- [6] Matsubara, Y; Yamasaki, T. VR-based interactive learning environment for power plant operator. IEEE International Conference on Computers in Education, 2002. v. 2, p.922-923.
- [7] Paucar, V L; de Sousa, O S Jr.; Almeida, I O; Rider, M J ; Bedrinana, M F ; Santos, J H. Software development with computer graphics, distributed data base and OOP for deregulated power systems analysis. LESCOPE - Engineering systems Conference on Power Engineering, p.198-202, Julho, 2004.
- [8] de Geus K; Dometerco, J H. Visualização qualitativa em engenharia utilizando Realidade Virtual. Espaço Energia, n. 1, p. 25-31, 2004.
- [9] Miranda, M F et al. Interface 3D aplicada à visualização de informações de uma subestação de energia armazenadas em banco de dados. In: Workshop De Aplicações De Realidade Virtual, 1., 2005, Uberaba. Anais... Uberaba: UFU, 2005.
- [10] Buriol, T M; Scheer, S. Processamento e visualização de campos em VRML e CAD 3D aplicados a projetos de iluminação. Dissertação de mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, 2006.
- [11] Garcia, F L S. Visualização de problemas eletromagnéticos 3D baseados em MEF utilizando VRML. IV Symposium on Virtual Reality, 2001, UFSC, p. 377-378.
- [12] Lu, L.; Connel, M.; Tullberg, O. The use of Virtual Reality in interactive Finite Element Analysis by Java 3D API. Conference at Chalmers, Gothenburg. Anais... Gothenburg, 2001.
- [13] Berta, J. Integrating VR and CAD. IEEE Computer Graphics and Applications, v. 19, n. 5, p. 14-19, 1999.
- [14] Zong, Y; Mueller, W. e Ma, W. A model representation for solid modeling in a virtual reality environment. Proceedings of the Shapes Modeling International, IEEE, 2002. p.183-190.
- [15] Corseuil, E T L et al. A VR tool for the visualization of CAD models. VII Symposium on Virtual Reality, 2004, São Paulo. Anais... Porto Alegre: SBC, 2004. p.327-338.
- [16] Moreira, V. de A. Iluminação elétrica. EdgarBlücher Ltda, São Paulo, 1999.
- [17] Marinoski, D L; Westphal, F S; Lamberts, R. Desenvolvimento de um algoritmo de cálculo luminotécnico para ambientes internos através do método ponto-a-ponto. In: Encontro Nacional Sobre Conforto no Ambiente Construído, Curitiba: ENCAC-COTEDI, 2003, p. 1066-1073.
- [18] Ministério do Trabalho e do Emprego. Cartilha: Meio Ambiente, Saúde e Trabalho. Disponível em: <[www.mte.gov.br/Empregador/segsau/Contudo/969.pdf](http://www.mte.gov.br/Empregador/segsau/Contudo/969.pdf)>. Acesso em: 30 nov. 2005.
- [19] Pavão, A C, Pouzada, E V S, Mathias M A. Electromagnetic field visualization through VTK software. Microwave and Optoelectronics Conference, 2001, Belém: SBMO/IEEE MTT-S, 2001. p. 21-24.
- [20] Huang, M. et al. Virtual Reality visualization of 3D electromagnetic fields. Argonne National Laboratory, Argonne, 1996. Disponível em: <<http://citeseer.ist.psu.edu/111951.html>>. Acesso em: 21 fev. 2006.
- [21] SOUZA, A. L. et al. Uma biblioteca VRML para a visualização de campos eletromagnéticos. In: ENCONTRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, 5., 2000, Itaipava. Anais... Rio de Janeiro: Eletrobrás, 2000.
- [22] McCormick, B H; Defanti, T A; Brown, M D. Visualization in Scientific Computing. Computer Graphics (edição especial), v. 21, n. 6, 1987.
- [23] Souza, C. A. S. de. Implementação de uma estrutura de dados para visualização científica. 92p. Mestrado (Ciências da Computação e Matemática Computacional) Universidade de São Paulo, São Carlos, 2003.
- [24] Schroeder, W; Martin, K; Lorensen, B. The Visualization Toolkit: an object-oriented approach to 3D graphics. 3rd. ed. Kitware, Inc, 2004.
- [25] Bryson, S. Virtual environments in scientific visualization. In: Earnshaw, R A; Watson, D. (Eds.) Animation and Scientific Visualization: tools & applications. Academic Press, 1993. p. 113-122.
- [26] Lee, A. Visualização e Realidade Virtual. Tradução Fecchio, M M; revisão técnica Labrada, R G. São Paulo: Makron Books, 1994.
- [27] Velho, L; Gomes, J. Sistemas gráficos 3D. São Paulo: IMPA, 2001.
- [28] Adaime, L M. Aplicação do *Visualization Toolkit* para pós-processamento de análises pelo método dos elementos. Dissertação de

- mestrado em Métodos Numéricos em Engenharia, UFPR, Curitiba, 2005.
- [29] Wolff, R S; Yaeger, L. Visualization of Natural Phenomena. Springer. Bk&CD-Rom, 1993.
- [30] Globus, A; Raible, E. Fourteen ways to say nothing with scientific visualization. IEEE Computer Graphics and Applications, v. 27, n. 7, p. 86-88, 1994.
- [31] Kageyama, A; Ohno, N. Tutorial Introduction to Virtual Reality: What Possibility are offered to our field? Cornell University Library, Kyoto, v.1, n.1, p.127-136, 2005.
- [32] Collins, B M. Data visualization: has it all been seen before? Earnshaw, R A; Watson, D (Eds.) Animation and Scientific Visualization: tools & applications. Academic Press, 1993. p. 3-28.
- [33] Manssour, I. H., Freitas, C. M. D. S. Visualização Volumétrica. Revista de Informatica Teórica e Aplicada, Porto Alegre, v. 9, n. 2, p. 97-126, 2002.
- [34] Espinha, R S L. Visualização interativa de malhas não estruturadas utilizando placas gráficas programáveis. 86 p. Dissertação (Mestrado em Informatica) Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.
- [35] Levoy M. Volume Rendering - Display of surfaces from volume data. IEEE. Computer Graphics & Applications, v. 8, n. 3, p. 29-37, 1988.
- [36] Westover, L. Interactive Volume Rendering. In: Workshop On Volume Visualization, 1989, North Carolina. Anais... University of North Carolina Press, 1989. p. 9-16.
- [37] Westover, L. Footprint Evaluation for Volume Rendering. In: International Conference On Computer Graphics And Interactive Techniques, 17., 1990, Dallas. Anais... New York: ACM Press, 1990. p. 367-376.
- [38] Lacroute, P; Levoy, M. Fast volume rendering using a Shear-Warp factorization of the viewing transformation. In: SIGGRAPH'94, Orlando, 1994. Anais... Orlando: ACM Press, 1994. p. 451-458.
- [39] Udupa, J K, Odhner, D. Shell Rendering. IEEE Computer Graphics & Applications, v. 13, n. 6, p. 58-67, 1993.
- [40] Wilhelms, J; Gelder, A V. A coherent projection approach for direct volume rendering. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, New York, v. 25, n. 4, p. 275-284, 1991.
- [41] Upson, C; Keeler, M. V-Buffer: Visible Volume Rendering. SIGGRAPH Computer Graphics, New York, v. 22, n. 4, p. 59-64, 1988.
- [42] Dey, T.K.; Giesen, J.; Hudson, J.; Delaunay based shape reconstruction from large dataParallel and Large-Data Visualization and Graphics, In: Proceedings. IEEE 2001 Symposium p. 139 – 146, 2001.