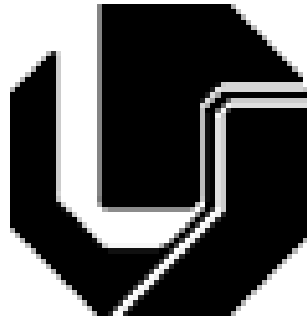


**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**



**O USO DO PARADIGMA RESTRIÇÕES
GEOMÉTRICAS PARA APOIO A PROJETOS
DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Arquimedes Lopes da Silva

JUNHO

2006

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA**

**O USO DO PARADIGMA RESTRIÇÕES
GEOMÉTRICAS PARA APOIO A PROJETOS
DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS**

Arquimedes Lopes da Silva

Texto da tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia, perante a banca de examinadores abaixo, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Aprovada em 2 de JUNHO de 2006.

Banca examinadora:

Edgard Lamounier Júnior, PhD (UFU) Orientador
Adélio J. Moraes, Dr (UFU)
Alcimar Barbosa Soares, Dr (UFU)
Décio Bispo, Dr (UFU) Co-Orientador
Romero Tori, Dr (Poli/USP)
Celso Volpe, Dr (UNISANTA)

O USO DO PARADIGMA RESTRIÇÕES GEOMÉTRICAS PARA APOIO A PROJETOS DE INSTALAÇÕES ELÉTRICAS

Arquimedes Lopes da Silva

Texto da tese apresentada à Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Prof. Edgard Lamounier Júnior, PhD
Orientador

A minha esposa Elaine pelo carinho, dedicação e contribuição no desenvolvimento e realização deste trabalho. E aos meus filhos, Pedro Victor e Augusto César, pelo tempo precioso que estive ausente.

Agradecimentos

A DEUS

Obrigado . . . porque sempre te ofereci tão pouco, e tu sempre me deste muito. Hoje sinto tanta alegria que me silencie diante de ti. Mas o meu silêncio brota de uma alma em festa, feliz por ser obra das tuas mãos. Sendo eu assim tão pequeno sempre pude contar com Tua grandeza, em momentos de intenso cansaço e preocupação encontrei calma em teus braços. Vou continuar nessa caminhada, não sou errante, tenho um objetivo e confio em Ti para alcançá-lo. Obrigado Senhor!!!

Aos meus Pais

Edmundo Soares da Silva e Dolacy Lopes da Silva, pelos exemplos de respeito, honestidade e simplicidade.

Ao meu Orientador

Sou grato ao Prof. Edgard Lamounier (*PhD*) pela amizade, incentivo e confiança durante todo o tempo de realização deste trabalho.

Aos Colegas, Mestres e Funcionários

Ao meu co-orientador Prof. Décio Bispo pela ajuda profissional nos tópicos de instalação elétrica.

Ao Prof. Alexandre Cardoso que nos contagia com o seu entusiasmo constante.

Ao amigo João Manoel pela presteza e suporte na continuidade deste trabalho.

Aos colegas de Goiânia, André, Rubens, Solange, Ubaldo, Zé Luis, PC e Ildeu pelo incentivo e apoio durante este Doutorado.

Aos colegas de Uberlândia, Kenedy, Marlene, Maria Emília, Adeon, Élcio, Márcio, Alexandre Araguari e tantos outros que estão imbuídos de um mesmo ideal.

À Marli, secretária da pós-graduação, pelo auxílio e presteza no desempenho de sua função.

Ao Cefet-GO por ter investido na minha formação.

Ao CNPq pelo suporte financeiro durante a realização deste Doutorado.

Enfim, agradeço a todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente deste trabalho.

Num mundo como o nosso, em que progridem ciência e suas aplicações tecnológicas cada dia mais, não se pode admitir que o homem se satisfaça durante toda a vida com o que aprendeu durante poucos anos, numa época em que estava profundamente imaturo. Deve informar-se, documentar-se, aperfeiçoar sua destreza, de maneira a se tornar mestre de sua práxis. O domínio de uma profissão não exclui o seu aperfeiçoamento. Ao contrário, será mestre quem continuar aprendendo.
(Pierre Furter)

Resumo

Silva, Arquimedes Lopes. *O uso do paradigma de restrições geométricas para apoio a projetos de instalações elétricas*, FEELT-UFU, Uberlândia, 2006, 170 páginas.

Atualmente, tem-se observado um crescimento no uso de software CAD (*Computer-Aided Design*) e CAE (*Computer-Aided Engineering*) para projetos na área de arquitetura, engenharia e construção. O profissional faz uso dessas ferramentas que automatizam e aceleram rotinas de projeto propiciando mais tempo para melhorar a qualidade do mesmo. Entretanto, a maioria dos sistemas atuais não somente consomem tempo de processamento (uma vez que todos os cálculos são refeitos à medida que acrescenta ou retiram-se informações do projeto), mas também exige do engenheiro projetista manter a seqüência do projeto em sua mente o que limita sua criatividade de testar diferentes alternativas de projeto.

Recentemente, projetos CAD/CAE tem explorado o uso do paradigma de restrições para o desenvolvimento de suas ferramentas de suporte. Através desta abordagem, o engenheiro cria os seus projetos estabelecendo restrições geométricas (relações geométricas entre as entidades do desenho) e/ou restrições de engenharia (equações que refletem leis físicas como desempenho, potência etc) entre as entidades do desenho. A maneira de satisfação das restrições durante a construção do projeto é que proporciona um ganho em termos tempo de resposta do sistema interagindo com o projetista.

Entretanto, as ferramentas atuais que trabalham com esta abordagem não apresentam aplicações na área de projetos para instalações elétricas. Isto é constatado neste trabalho através de um estudo investigativo de ferramentas atuais, procurando destacar as vantagens como diminuição de tarefas repetitivas e as limitações como dependência do engenheiro na construção da tubulação por onde passará os condutores dos diversos circuitos elétricos, cálculo manual do menor caminho das tubulações, o que contribuiria para uma melhor eficiência energética do projeto. Com base nestas limitações propõe-se a construção de um sistema baseado em restrições geométricas para a área de projetos de instalações elétricas residenciais que atenda aos anseios do mercado e que possibilite futura integração entre os diversos projetos de instalações prediais. Para isto foram desenvolvidos algoritmos incrementais, baseados em grafos, que permitam a construção do desenho aproveitando o que já foi desenhado. Os algoritmos permitem criar o projeto de instalação elétrica a partir da localização dos pontos de energia juntamente com suas conexões como interruptores, eletrodutos e condutores, e, paralelamente, facilitam os cálculos de dimensionamento destas conexões.

O sistema protótipo apresenta novas características como a migração para projetos 3D, o lançamento automático de tubulações e fiações, entre outras. Tais características aumentam a produtividade do engenheiro projetista. Esta produtividade é devido à flexibilidade dos algoritmos incrementais e a utilização de ambiente tridimensional permitindo um entendimento imediato do que está ocorrendo durante a construção do projeto. O ambiente tridimensional que pode ser evoluído para um ambiente virtual proporciona um melhor discenimento espacial, reduzindo, conseqüentemente, o tempo de análise.

Palavras-chave

CAD, Restrições geométricas, Instalações elétricas.

Abstract

Silva, Arquimedes Lopes. *Using geometric constraint approach to support electrical installation design*, FEELT-UFU, Uberlândia, 2006, 170 páginas.

Nowdays, a growth has been observing in the software use CAD (*Computer-Aided Design*) and CAE (*Computer-Aided Engineering*) for design in area of the architecture, engineering and building . The professional makes use of those tools that automate and accelerate design routines propitiating more time to improve the quality of them. However, most of the current systems not only consumes time of processing (once all the calculations are re-done in order to increase or to remove information of the design), as they require that the designer keeps in mind the design sequence what limits his/her creativity of testing different design alternatives.

Recently, *CAD/CAE* designs has explored the use of the constraints paradigm for the development of its support tools. Through this approach, the engineer creates his/her designs establishing geometric constraints (geometric relationships among the entities of the drawing) and/or engineering constraints (equations that reflect physical laws as performance, power etc) among the entities of the drawing. The way of constraints satisfaction during the building of the design is that propitiates a gain in terms of answer time regarding the system interaction with the designer.

However, current tools that work with this approach don't present applications in the area of electrical installation design. This is verified in this work through an investigative study of current tools, trying to highlight the advantages as decrease of repetitive tasks and the limitations as the engineer's dependence in the building of the tubulation through where it will pass the conductors of the several electric circuits, manual calculation of the lower tubulation path (what would contribute to better design energetic efficiency). Based on these limitations the building of a system geometric constraints-based for the area of residential electrical installation design is proposed, so that it assists to the market needs and that makes possible future integration among the several designs of building installation. For this reason, incremental graph-based algorithms were developed so that they allow the construction of the drawing taking advantage of what it was already drawn. The algorithms allow to create electrical installation design starting from the location of the energy points with its connections as switches, conduits and conductors, and, at the same time, they facilitate the dimensioning of these connections calculations.

The prototype system presents new features such as the migration for 3D designs, the automatic launching of tubulation and wires, among other. Such characteristics increase the engineer designer's productivity. This productivity is due to the flexibility of the incremental algorithms and the use of three-dimensional environment allowing an immediate understanding of what is happening during the building of the design. This environment can be developed into a virtual environment which can provides a better space understanding, reducing, consequently, the time of analysis.

Keywords

CAD, Geometric constraints, Electrical installation.

Sumário

Sumário	xii
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xviii
Lista de Códigos	xix
Simbologia	xxi
1 Introdução	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivo da Tese	3
1.3 Contribuições da Tese	3
1.4 Tipos de Restrições	4
1.5 Projetos CAD baseado em Restrições	5
1.6 Etapas de um Projeto de Instalação Elétrica	7
1.7 Organização da Tese	8
2 Trabalhos Relacionados	10
2.1 Introdução	10
2.2 Paradigma de Restrições Geométricas	10
2.2.1 Abordagem baseada em equações	11
2.2.2 Abordagem baseada na construção geométrica	14
2.2.3 Comparação entre Sistemas baseados em Restrições	19
2.3 Ferramentas <i>CAD/CAE</i> Comerciais	20
2.3.1 Autopower	20
2.3.2 Lumine	22
2.3.3 CAD/Elet	23
2.3.4 PRO-Elétrica	24
2.3.5 Comparação entre Sistemas <i>CAD</i> Comerciais	25
2.4 Considerações Finais	28
3 Circuitos Elétricos baseados em Restrições	29
3.1 Introdução	29

3.2	Representação de Restrições	29
3.3	Satisfação de Restrições Elétricas	31
3.4	Principais Características do Sistema Desenvolvido	36
3.4.1	A natureza incremental dos algoritmos	36
3.4.2	Suporte para manipulações diretas	37
3.4.3	Limitações	37
3.5	Resumo e conclusão	37
4	Projetos de Instalações Elétricas baseado em Restrições	39
4.1	Introdução	39
4.2	Representação de Restrições	39
4.3	Satisfação de Restrições	43
4.3.1	Lançamento de pontos de energia	43
4.3.2	Formação de Circuitos	50
4.4	Complexidade algorítmica do sistema	52
4.5	Considerações finais	53
5	Arquitetura do Sistema Proposto - Análise e Implementação	55
5.1	Introdução	55
5.2	Especificação de requisitos	56
5.3	Modelos de caso de uso	58
5.4	Análise do Sistema	63
5.4.1	Diagrama de Classes	63
5.5	Arquitetura do Sistema	67
5.5.1	A Interface Gráfica com o Usuário	68
5.5.2	O Gerenciador de Restrições	71
5.5.3	Grafo de Restrições	72
5.5.4	Lista Arquitetônica	72
5.6	Implementação do Sistema Proposto	72
5.6.1	Telas para desenhos 2D/3D	72
5.6.2	Implementação do Grafo de Restrições	73
5.6.3	Implementação da Lista Arquitetônica	78
5.7	Considerações sobre um projeto genérico	79
5.8	Considerações Finais	84
6	Resultados, Discussões e Melhoramentos	85
6.1	Introdução	85
6.2	Principais Características do sistema desenvolvido	85
6.2.1	Estudo de Caso	86
6.2.2	Natureza incremental	91
6.2.3	Formação Automática da Malha de Teto	91
6.2.4	Eficiência energética	92
6.2.5	Seqüência Didática de Projeto	92
6.2.6	Visualização/Interação em 2D/3D	93
6.2.7	Dimensionamento automático	93
6.2.8	Deteção de obstáculos	94
6.2.9	Comparação com trabalhos anteriores	94
6.3	Verificação do Funcionamento do Sistema	96

6.4	Limitações e Melhoramentos	103
6.5	Considerações finais	104
7	Conclusões e Trabalhos Futuros	105
7.1	Introdução	105
7.2	Conclusões	105
7.3	Trabalhos Futuros	107
	Referências Bibliográficas	109
	Apêndices	118
A	Projeto de Instalações Elétricas	118
A.1	O Planejamento da Instalação	118
A.1.1	Dimensionamento de Condutores, Eletrodutos e Disjuntores . .	120
A.1.2	Atualização do Projeto	125
A.2	Exemplo	125
A.2.1	Iluminação	125
A.2.2	Tomadas	126
A.2.3	Tipo de Fornecimento	127
A.2.4	Formação dos circuitos	129
A.2.5	Dimensionamento dos condutores	130
A.2.6	Dimensionamento dos eletrodutos	132
A.2.7	Dimensionamento dos disjuntores	133
B	Relatório de Avaliação	135
	Índice Remissivo	139

Lista de Figuras

1.1	Restrições geométricas (ligações entre componentes) e de engenharia (equação referente ao fenômeno físico).	4
1.2	Satisfação de uma restrição geométrica usando grafo.	6
1.3	Etapas em um projeto de instalação elétrica.	7
2.1	<i>Abordagens para projetos baseados em restrições.</i>	11
2.2	(a) Um problema de restrições geométricas e sua (b) representação em grafo.	16
2.3	Integração das restrições geométricas e manipulação direta pelo ICBSM.	18
2.4	<i>Tela do software Autopower. Fonte: [Autoenge 2005]</i>	21
2.5	<i>Software AltoQi. Fonte: [Altoqi 2004]</i>	22
2.6	<i>Projeto elétrico no CAD/Elet. Fonte: [VipTec 2005]</i>	23
2.7	<i>Projeto elétrico desenvolvido no PRO-Elétrica. Fonte: [Multiplus 2005]</i>	24
3.1	Componente de circuito no desenho e no grafo.	30
3.2	Circuito completo e o grafo para simulação.	31
3.3	Ligação entre dois resistores e a representação no grafo.	31
3.4	Formação de um circuito através das <i>conexões</i>	32
3.5	A restrição conexão se adapta às transformações geométricas dos componentes.	32
3.6	Simplificação do Grafo do Circuito para Análise de Circuitos.	33
3.7	Ramo genérico de uma rede qualquer.	35
3.8	Circuito simulando.	36
4.1	Uma instalação elétrica e o seu grafo correspondente.	40
4.2	Detalhe de um circuito de instalação elétrica.	41
4.3	Circuito da instalação elétrica modelado com componentes de circuitos elétricos.	41
4.4	Grafo do circuito 2.	42
4.5	Desenho contendo cargas de iluminação interligadas por uma malha de eletrodutos e o grafo correspondente.	43
4.6	Triangulação de Delaunay.	44
4.7	Grafo Orientado a Partir da Malha.	45
4.8	Um obstáculo no caminho de um eletroduto.	47
4.9	Roteamento da malha de teto usando o algoritmo de <i>Dijkstra</i>	47
4.10	Exemplo da aplicação do algoritmo de Dijkstra.	48
4.11	Uma rota no grafo da Figura 4.10.	49
4.12	O interruptor S_1 é considerado como uma carga no grafo.	50
4.13	Grafo da instalação elétrica.	50

4.14 Rota destacada no Grafo.	51
5.1 Casos de uso do sistema.	59
5.2 Diagrama de classes do sistema.	64
5.3 Especificação da Classe Graph.	64
5.4 Especificação da Classe Load.	65
5.5 Especificação da Classe Conduit.	65
5.6 Especificação da Classe Circuit.	66
5.7 Especificação da Classe Route.	66
5.8 Especificação da Classe Architecture.	67
5.9 Arquitetura do Sistema	67
5.10 Sistema com um projeto arquitetônico.	68
5.11 Barra de botões.	69
5.12 Volante de navegação.	70
5.13 Barra de comando e status.	70
5.14 Barra de menu.	71
5.15 Dimensionamento das viewports.	73
5.16 Modelo 2D e Modelo 3D de uma lâmpada.	75
5.17 Modelo 2D e Modelo 3D de uma tomada.	76
5.18 Modelo 2D e Modelo 3D de um eletroduto.	78
5.19 Projeto arquitetônico de uma residência.	80
5.20 Projeto hidráulico de uma residência.	81
5.21 Projeto elétrico de uma residência.	82
5.22 Sistema genérico.	83
5.23 Arquitetura do Sistema genérico.	84
6.1 Planta baixa do estudo de caso	86
6.2 Projeto elétrico evidenciando a malha de eletrodutos e pontos de energia no teto	87
6.3 Restrição eletroduto entre uma tomada e uma carga existente.	87
6.4 <i>Grafo de Restrições</i> atualizado após a inserção da tomada <i>t</i>	88
6.5 Identificando um obstáculo no desenho.	88
6.6 Uma rota destacada na malha.	89
6.7 Caixa de diálogo para a formação de circuitos.	90
6.8 Memorial descritivo da instalação elétrica.	90
6.9 Caminho no grafo para o cálculo da distância da carga <i>b</i> ao <i>QD</i>	91
6.10 Formação automática da malha de eletrodutos a partir de pontos de energia no teto	92
6.11 Experiência em projetos de instalações elétricas.	97
6.12 Uso de software em instalações elétricas.	98
6.13 Funcionalidades do <i>arqElectrical</i>	98
6.14 Demais funcionalidades do <i>arqElectrical</i>	99
6.15 Usabilidades do <i>arqElectrical</i>	100
6.16 Eficiência do <i>arqElectrical</i>	100
6.17 Uso do <i>arqElectrical</i> no ensino de Instalações elétricas.	101
6.18 Uso do <i>arqElectrical</i> por profissionais da área.	101
6.19 Independência do AutoCAD.	102
6.20 Critérios IsoNorm.	102
A.1 Planta arquitetônica auxilia na determinação dos pontos elétricos.	119

A.2	Uma instalação elétrica típica.	120
A.3	Um circuito da instalação modelado com componentes de circuitos elétricos.	121
A.4	Diagrama Fasorial do Circuito da Figura A.3.	122
A.5	Detalhe do quadro de distribuição.	134
A.6	Detalhe do quadro de distribuição.	134

Lista de Tabelas

2.1	Características de Sistemas baseados em restrições	20
2.2	Características de Ferramentas CAD para Instalações Elétricas	27
5.1	Ícones da barra de botões	69
6.1	Sistemas baseados em restrições	95
6.2	Características de Ferramentas CAD para Instalações Elétricas	96
A.1	Tabela de Símbolos Elétricos.	120
A.2	Fatores de correção para agrupamento de condutores	124
A.3	Disposição dos cabos em camada única em parede ou piso	124
A.4	Tabela de seção Mínima dos Condutores	124
A.5	Tabela de Iluminação	125
A.6	Tabela de Tomadas	126
A.7	Divisão dos Circuitos	130
A.8	Dimensionamento Queda de Tensão	130
A.9	Dimensionamento Capacidade de Corrente	131
A.10	Determinação da seção S do condutor em (mm ²)	131
A.11	Balanceamento de fases	132
A.12	Dimensionamento dos disjuntores	133

Lista de Códigos

5.6.1 Códigos para desenho em viewports.	73
5.6.2 Varredura do grafo.	75
5.6.3 Códigos para desenho da lâmpada.	76
5.6.4 Códigos para desenho da tomada.	77
5.6.5 Percorrendo a lista de objetos arquitetônicos.	79

Lista de Algoritmos

ATDMT	44
RMT	49
DAC	52

Símbolos e Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
Brep	Boundary representation
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CSG	Constructive Solid Geometry
DXF	Drawing Interchange Format
GCE	Geometric Constraint Engine
G.L.'s (g.l.'s)	Graus de Liberdade
INCES	Incremental Constraint Equation Solver
PGGC	Propagação Global em Geometria Construtiva
PLGC	Propagação Local em Geometria Construtiva
QD	Quadro de Distribuição
RA	Realidade Aumentada
RV	Realidade Virtual

Lista de Publicações Relacionadas a este Trabalho:

1. Silva, A.; Lamounier, E., 2002a. An Incremental Algorithm to Support Geometric Constraint Satisfaction in Engineering Design. In: *6-th International Conference on Information Visualization (IV'02)*. London, England.
2. Silva, A.; Lamounier, E., 2002b. Incremental Geometric Constraint Satisfaction to Support Engineering Design. In: *XIV Congresso Brasileiro de Automática*. Natal, Brasil.
3. Silva, A.; Lamounier, E., 2003. Using Geometric Constraint to Develop CAD Systems for Electric Installations. In: *Modelling, Simulation and Optimization (MSO 2003)*. Alberta, Canada.
4. Silva, A.; Lamounier, E.; Bispo, D., 2004a. Uma aplicação do Paradigma de Restrições Geométricas na Construção de Projetos de Instalações Elétricas. In: *XV Congresso Brasileiro de Automática*. Gramado, Brasil.
5. Silva, A.; Lamounier, E.; Cardoso, A., 2004b. Um Sistema CAD, associado a Técnicas de Realidade Virtual, para Projetos de Instalações Elétricas. In: *VII Symposium on Virtual Reality*. São Paulo, Brasil.
6. Silva, A.; Lamounier, E.; Bispo, D., 2004c. Using Geometric Constraint-Based Paradigm to Develop Electric Installation Design. In: *XXV CILAMCE*. Recife, Brasil.
7. Silva, A.; Lamounier, E.; Bispo, D.; Cardoso, A., 2005a. Uma ferramenta CAD para apoio a projetos de instalações elétricas. In: *Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*. Belo Horizonte, Brasil.
8. Silva, Arquimedes Lopes da ; Lamounier JR, Edgard ; Cardoso, A., 2005b. O uso de restrições geométricas em CAD de instalações elétricas. In: *ISA SHOW SOUTH AMERICA 2005*, São Paulo. 5º Congresso Internacional de Automação, Sistemas e Instrumentação.
9. Silva, Arquimedes Lopes da ; Lamounier JR, Edgard ; Cardoso, A., 2005c. Projeto Elétrico Virtual. In: *WARV'05, 2005*, Uberlândia-MG. Workshop de Aplicações de Realidade Virtual.

10. Silva, Arquimedes Lopes da ; Lamounier JR, Edgard ; Cardoso, A., 2006a. Using Geometric Constraints to Support Virtual Electrical Installation Design In: *VIII SVR*, Belém-PA. VIII Symposium on Virtual Reality.
11. Silva, Arquimedes Lopes da ; Lamounier JR, Edgard ; Cardoso, A., 2006b. A constraint-based CAD system to support electrical installation design. In: *ICGG2006*, Salvador-BA. 12th International Conference on Geometry and Graphics. A ser apresentado.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Motivação

O uso de ferramentas *CAD*¹/*CAE*² é de grande importância na área de engenharia, uma vez que diversas alternativas de projetos podem ser testadas antes de se obter a versão final de um produto.

Considerando-se a área de instalações elétricas residenciais-prediais, as ferramentas *CAD/CAE* existentes aceleram a produção de projetos elétricos, através da automação de diversas tarefas, tais como: utilização de símbolos padronizados, lançamento de partes de circuitos, cálculos para dimensionamentos de materiais, entre outros. Entretanto, estudos desenvolvidos durante a construção de projetos de instalações elétricas mostram que estas ferramentas apresentam as seguintes limitações:

- dependência excessiva do engenheiro projetista, seja na sequência do próprio projeto, na confirmação de cálculos, ou na construção demorada da malha de teto, quando se busca obter economia de materiais através de trajetórias mais curtas para os circuitos elétricos;
- demanda de horas de treinamento e aprendizagem na utilização destas ferramentas, como consequência da limitação anterior;

¹CAD (Computer Aided Design) é o nome genérico de sistemas computacionais (software) utilizados pela engenharia, geologia, arquitetura e design para facilitar o projeto e desenho técnicos.

²CAE (Computer-aided Engineering) é a aplicação computacional dentro da engenharia para analisar/simular cálculos de engenharia a partir de uma representação gráfica.

- não é dada ênfase na visualização tridimensional do projeto e em como modificações feitas neste ambiente afetaria a planta baixa, acarretando o atraso da entrega do projeto devido ao tempo necessário para o discernimento espacial feito pelo engenheiro e/ou cliente;
- não existe uma preocupação quanto a eficiência energética. O engenheiro é que na maioria das vezes procura economizar material visando diminuição de custo e minimizando perdas de energia;
- incapacidade de providenciar soluções intermediárias do projeto geométrico. Por exemplo, os sistemas atuais demandam que todas as cargas de um projeto sejam lançadas, antes que a tubulação ótima seja determinada. Isto reduz a flexibilidade do engenheiro de testar diferentes alternativas de projetos;
- o dimensionamento não é incremental. Isto é, o sistema não informa os valores atualizados das seções de condutores e eletrodutos quando as cargas elétricas de um circuito são inseridas ou removidas. É necessário refazer todo o projeto a fim de testar diferentes configurações.

Recentemente, têm-se notado o uso de sistemas *CAD/CAE* baseados no paradigma de restrições. Estes sistemas permitem ao engenheiro criar seus projetos em termos de relações impostas sobre entidades geométricas [Leeuwen 1999, Robert, Nuria e Anton 2001, Vries, Jessurun e Kelleners 2000]. Como exemplo, pode-se citar relações do tipo *perpendicularismo* entre segmentos de retas e de tipo *tangência* entre um segmento de reta e uma circunferência. Assim, a geometria de um projeto pode ser modificada de maneira mais eficiente e natural [Hoffman, Gao e Yang 2004].

Quando se desenvolve um projeto baseado em restrições, o engenheiro cria entidades geométricas e impõe relações entre elas. Então, o sistema computacional deve satisfazer estas relações, permitindo ainda a interação com o engenheiro através de mecanismos solucionadores de restrições. Entretanto, alguns sistemas baseados em restrições satisfazem novamente todas as restrições existentes em um projeto quando uma nova é inserida. Este processo consome tempo e prejudica a interatividade homem-máquina exigida por demanda de mercado.

1.2 Objetivo da Tese

O objetivo desta tese é projetar uma arquitetura de um sistema baseado em restrições a fim de suprir as limitações dos sistemas *CAD/CAE* atuais para projetos de instalações elétricas. Além disso, este trabalho pretende avaliar um conjunto de algoritmos e técnicas computacionais que reduzem estas limitações. Os algoritmos baseados no paradigma de restrições deverão suportar eficientemente todo processo *CAD/CAE*, seja durante a construção do desenho, execução dos cálculos e análises inerentes ao projeto ou durante a apresentação (visualização) do mesmo. Para isto, as seguintes metas são propostas:

- Analisar as ferramentas *CAD*, para instalações elétricas, existentes destacando suas vantagens e desvantagens;
- Analisar técnicas de modelagem e visualização tridimensional que melhor se adaptem à necessidade de associação da planta baixa de uma instalação elétrica a sua respectiva representação 3D;
- Implementar um sistema protótipo que demonstre a viabilidade da arquitetura proposta;
- Avaliar o sistema desenvolvido junto a profissionais, professores e alunos da disciplina instalações elétricas em cursos de ensino técnico e superior.

1.3 Contribuições da Tese

Após desenvolver o trabalho de pesquisa, inspirado pelos objetivos e metas acima citados, entende-se que esta tese apresenta as seguintes contribuições:

1. Um estudo comparativo das diversas técnicas computacionais utilizadas em sistemas *CAD/CAE* baseado em restrições geométricas;
2. Um estudo comparativo das diversas características funcionais e de usabilidade encontradas em ferramentas *CAD/CAE* para instalações elétricas;
3. Um conjunto de algoritmos que permitam acelerar o processo de desenvolvimento de um projeto de instalação elétrica;

4. Desenvolvimento de um protótipo experimental que valida o exposto no item anterior e providencia ao engenheiro uma maneira mais natural de desenvolver seu projeto (seqüência didática);
5. O sistema acima mencionado também permite uma maior associação entre a planta baixa e o seu modelo 3D, através da exploração de técnicas de visualização.

1.4 Tipos de Restrições

Um projeto de engenharia é especificado em termos de suas restrições geométricas e de engenharia. As restrições geométricas são relações impostas entre duas entidades geométricas diferentes (por exemplo, a relação tangência entre uma reta e uma circunferência). Enquanto, restrições de engenharia são equações usadas para representar princípios básicos de engenharia, como a performance de um motor elétrico e a dissipação de energia em uma resistência etc. A Figura 1.1 ilustra o conceito de restrição geométrica e restrição de engenharia.

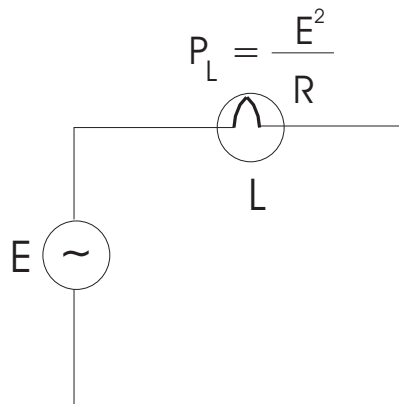


Figura 1.1: Restrições geométricas (ligações entre componentes) e de engenharia (equação referente ao fenômeno físico).

No circuito elétrico formado pela lâmpada, a rede de alimentação e os condutores têm-se uma corrente elétrica circulando que, ao passar pelos filamentos da lâmpada, converte-se em energia luminosa. Os condutores mantêm geometricamente ligados os componentes: fonte de energia da rede e a lâmpada. De acordo com a figura anterior, se L fosse movido para outra posição permaneceria ainda ligada a E . As restrições de engenharia são todas as equações que descrevem o sistema real modelado. Estas equações são mantidas atualizadas mesmo com alterações de valores dos elementos.

Se o valor de E fosse alterado pelo projetista, isto provocaria a alteração da potência dissipada na lâmpada, bastando o sistema estar completamente restringido, ou seja, totalmente equacionado. Nas implementações apresentadas nesta tese não são utilizados os conceitos de restrição de engenharia.

À medida que o projeto cresce, aumenta o número de restrições entre suas entidades geométricas, e com isto aumenta em complexidade a configuração geométrica, pois o sistema deve satisfazer todas as restrições existentes. Assim, é necessário ter um mecanismo que permita a satisfação das restrições e mantenha o retrato fiel, a cada instante, atualizado do projeto.

1.5 Projetos CAD baseado em Restrições

Sistemas *CAD* tradicionais suportam apenas detalhes geométricos onde um objeto é definido em função de suas dimensões e das localizações de suas partes constituintes [Serrano 1991]. No campo de modelagem de sólidos, os sistemas existentes são representados em três categorias principais: Geometria Construtiva de Sólidos (*CSG* - Constructive Solid Geometry³), boundary representação - (*BREP* - Boundary representation⁴) e subdivisão espacial ⁵ [Gomes e Velho 1998, Gomes e Velho 2001].

Tais representações requerem do projetista a utilização de ferramentas computacionais eficientes para processar cálculos algébricos, a fim de determinar os valores de posição e dimensão do objeto modelado. Se o objeto mudar de posição, por exemplo, todos cálculos devem ser refeitos em função da nova posição. Modelos definidos em função de restrições geométricas possibilitam uma maneira mais intuitiva de visualizar as alterações desejadas pelo projetista. Esta característica permite que a alteração da geometria, através do movimento de uma entidade geométrica, seja propagada para os demais, ao qual está restringida. Esta resposta imediata a qualquer excitação geométrica é que tornam competitivas as ferramentas *CAD* baseadas em restrições.

Geralmente, o desenho é representado por um grafo de restrições onde cada vértice representa uma entidade geométrica e, os arcos representam as restrições entre duas en-

³permite criar (modelar) um objeto complexo usando operações booleanas (união, intersecção e diferença) que combine objetos primitivos.

⁴representa um objeto sólido pela sua superfície de contorno que é preenchida tornando-se um sólido.

⁵todo o espaço é subdividido em células regulares (voxel) e um objeto é especificado pelo conjunto de células que ele ocupa.

tidades. As técnicas de representação de restrições são abordadas no próximo capítulo. Um exemplo de geometria baseada em restrições é mostrado na Figura 1.2. O desenho é composto de duas entidades geométricas, uma circunferência C e um segmento de reta SR , ambas possuem três graus de liberdade (2 translações e 1 rotação) podendo se movimentar através de manipulações diretas do usuário.

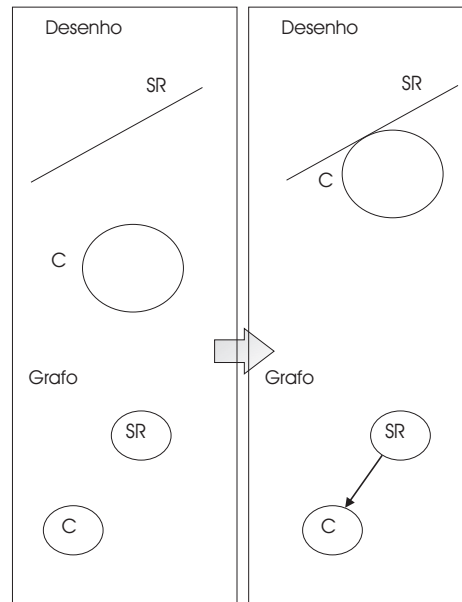


Figura 1.2: Satisfação de uma restrição geométrica usando grafo.

Após o estabelecimento da restrição tangência entre as duas entidades ocorreram duas atualizações:

Uma no Desenho: A circunferência moveu-se para satisfazer a restrição e com isto perdeu graus de liberdade, ficando condicionado à outra entidade.

Outra no Grafo: Criou-se um arco entre os dois vértices no sentido daquela entidade que se moveu, a fim de satisfazer a restrição.

Qualquer transformação ocorrida no segmento de reta SR é propagada para a circunferência C . A circunferência admite apenas a transformação do tipo rotação, em torno do seu centro, que mantenha a restrição tangência com o segmento. Esta é uma maneira de satisfazer a restrição, o sistema poderia inverter o sentido do arco no grafo de acordo com a seleção de uma entidade pelo usuário. Assim, a circunferência propagaria as transformações sofridas para o segmento de reta.

1.6 Etapas de um Projeto de Instalação Elétrica

Em um projeto de instalação elétrica o engenheiro deve lançar todas as cargas elétricas em uma planta arquitetônica e procurar fazer a tubulação interligando estas cargas até o quadro de distribuição de onde chega a energia da concessionária e saem os condutores que formam os circuitos de alimentação das cargas. A Figura 1.3 mostra as principais etapas de desenhos e cálculos que o engenheiro deve considerar a fim de realizar o projeto.

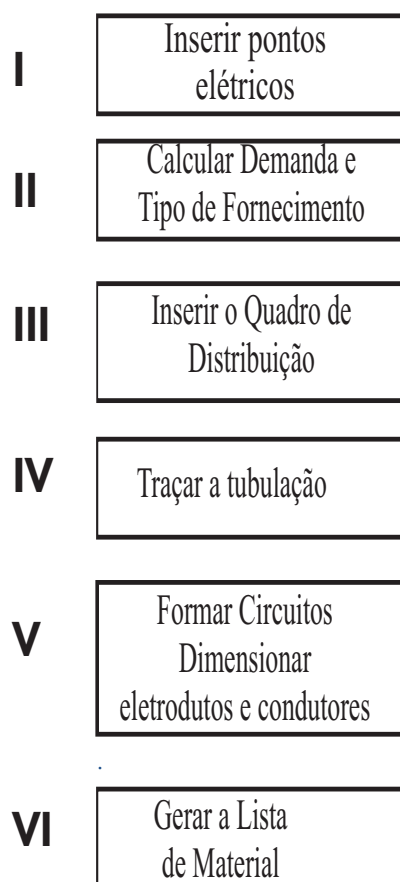


Figura 1.3: Etapas em um projeto de instalação elétrica.

Na etapa I deve-se inserir os pontos elétricos (cargas de iluminação/força e interruptores).

Na etapa II, com os dados das cargas inseridos, calcula-se a potência total da instalação (carga instalada), o valor da demanda e o tipo de fornecimento de energia por parte da concessionária.

Na etapa III, deve ser inserido o quadro de distribuição de circuitos localizado nas proximidades do centro de carga (baricentro da instalação).

A etapa IV, traçado da tubulação, consiste em ligar pontos de energia de tal maneira

que os condutores internos aos tubos (eletrodutos) levem energia às cargas.

A etapa V consiste na formação dos circuitos (conjunto de cargas energizados por um grupo de condutores que saem do quadro de distribuição). Nesta etapa, o projetista busca sempre um “menor caminho” na tubulação a fim de economizar material e energia (perdas nos cabos).

Finalmente, na etapa VI deve-se gerar uma lista de material que possibilite a concretização de orçamentos visando à execução do projeto.

1.7 Organização da Tese

A fim de alcançar os objetivos propostos, este trabalho é dividido e apresentado em sete capítulos, incluindo esta introdução, com a estrutura descrita a seguir.

O Capítulo 2 apresenta as técnicas da abordagem baseada em restrições destacando as principais vantagens e limitações de cada uma delas. O capítulo apresenta também as ferramentas *CAD-CAE* relacionadas com projetos de instalações elétricas demonstrando suas características e comparando-as entre si.

O Capítulo 3 apresenta detalhes algorítmicos de uma ferramenta *CAD* baseada em restrições e aplicada à construção e análise de circuitos elétricos.

O Capítulo 4 descreve como um sistema de instalações elétricas é modelado de acordo com a abordagem de restrições, mais especificamente a abordagem em grafos da geometria construtiva. A satisfação de restrições é mostrada à medida que o grafo se mantém atualizado a cada inserção de nova carga devido a aparelhos eletro-eletrônico ou a finalização da malha de eletrodutos localizada no teto da residência.

O Capítulo 5 mostra como foi a análise do sistema desde a sua concepção através da especificação de requisitos, diagramas de casos de uso e diagrama de classes, até a sua arquitetura destacando a implementação dos componentes *GUI* (Interface Gráfica com o Usuário) e *GR* (Grafo de Restrições). O sistema demonstra a teoria abordada no Capítulo anterior e evidencia a aplicabilidade dos principais algoritmos desenvolvidos.

O Capítulo 6 descreve o estudo de caso adotado, evidenciando as contribuições deste trabalho, exemplificando cada um com fotos e/ou diagramas. Este capítulo apresenta a avaliação do sistema feita por estudantes e profissionais relacionados com o tema de projetos de instalações elétricas. Por fim, são mostradas as limitações do sistema e sugestões para melhoramento.

O Capítulo 7 descreve as principais conclusões desta tese e apresenta sugestões para futuros trabalhos de pesquisa.

Por fim, a lista de referências bibliográficas é apresentada, bem como os anexos sobre projetos de instalações elétrica e o questionário utilizado por supostos usuários para a avaliação do sistema.

Capítulo 2

Trabalhos Relacionados

2.1 Introdução

Este capítulo apresenta um estudo do paradigma de restrições geométricas, evidenciando as suas características com o objetivo de identificar o estado da arte na referida área. Além disso, também é apresentada uma pesquisa sobre as principais ferramentas *CAD/CAE* para projetos de instalações elétricas, existentes no mercado. Em seguida, dois quadros comparativos que nortearam o direcionamento desta tese são analisados. Sendo que um quadro relaciona sistemas baseados em restrições e o outro relaciona algumas das ferramentas *CAD/CAE* comerciais estudadas. Finalmente, o capítulo destaca as conclusões obtidas dos referidos estudos que conduziram a proposta de pesquisa deste trabalho.

2.2 Paradigma de Restrições Geométricas

O paradigma de restrições geométricas com aplicações para *CAD/CAE* pode ser dividido em duas categorias principais: a abordagem baseada em equações e a abordagem de construção geométrica. A Figura 2.1 destaca a classificação utilizada dentro da área de restrições.

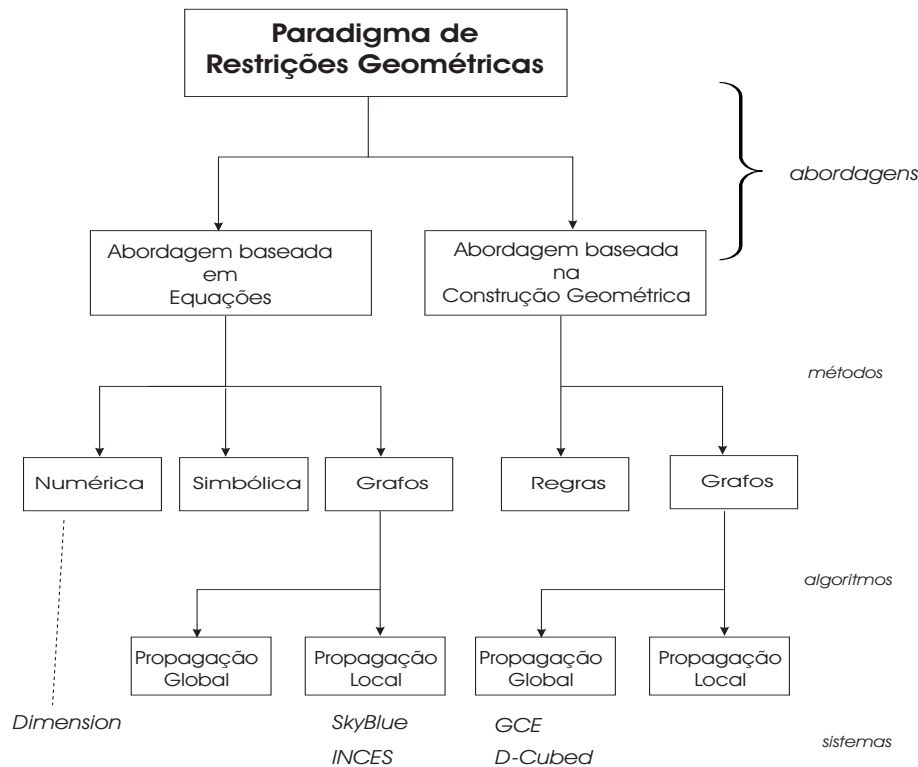


Figura 2.1: *Abordagens para projetos baseados em restrições.*

2.2.1 Abordagem baseada em equações

A abordagem baseada em equações transforma o problema de restrições geométricas e de engenharia, como definidos no Capítulo 1, em um conjunto de equações que são resolvidas a cada atualização dos modelos em desenho por um método de resolução de equações. Esta abordagem quando utilizada no pré-processamento de estudos específicos de sistemas de restrições é considerada por muitos pesquisadores como extremamente útil e muito prática [Choi et al. 2003, Dohmen 1995]. Os métodos adotados, de acordo com a técnica específica usada na resolução do sistema de equações, podem ser classificados em: numéricos, simbólicos e baseados em grafo.

Métodos numéricos

A resolução das equações é por meio de técnicas iterativas de cálculo numérico, como por exemplo o método de Newton Raphson utilizado nos solucionadores descritos em [Kamel, Enright e Ma 1993] e [Dhooge, Govaerts e Kuznetsov 2003] entre outras, encontradas na literatura. Em geral, uma boa aproximação da solução desejada deve ser fornecida para garantir a convergência [Davis 2004, Joan-Arinyo, Soto e Vila 2003]. Isto significa que os valores iniciais do desenho devem ser fornecidos pelo usuário e então

o método deve satisfazer as restrições do conjunto de equações.

O *DIMENSION* [Light e Gossard 1982] é um sistema *CAD*, para a área de engenharia mecânica, baseado em métodos numéricos. Ele provê restrições para segmentos de retas e para dimensionamento linear, angular e radial. Quando todos valores de restrições são informados, o algoritmo do sistema calcula a geometria exata correspondente ao conjunto de valores informados.

Outros sistemas encontrados em [Hillyard e Braid 1978, Sakurai e Gossard 1983] são baseados nesta técnica de abordagem de restrições.

Métodos simbólicos

Estes métodos simbólicos calculam as bases de *Gröbner*⁶ do sistema de equações algébricas. Dentre os algoritmos para o cálculo das bases de *Gröbner* destacam-se o algoritmo de decomposição Wu-Ritt's [Granvilliers, Monfroy e Benhamou 2001] e o algoritmo de Buchberger [Datta 2003]. Estes métodos, basicamente, transformam o sistema de equações em um sistema na forma triangular com o mesmo conjunto solução.

Métodos baseados em grafos

Métodos baseados em grafo, onde os vértices representam as variáveis e os arcos representam as restrições, têm sido introduzidos para dividir o conjunto de equações em conjuntos menores melhorando a performance computacional [Joan-Arinyo et al. 2002, Joan-Arinyo et al. 2003, Lamounier 1996]. Entretanto, esta abordagem apresenta problema em tempo de processamento quando trabalha com um grande grupo de restrições devido a re-satisfação destas quando uma nova é inserida. A re-satisfação de restrições, neste caso, consiste em montar um novo grafo a cada processo. Algoritmos baseados em propagação local [Freeman-Benson, Maloney e Borning 1990, Zanden 1992, Yu e Kumar 2000] melhoram a performance na resolução das equações.

O *DeltaBlue* [Freeman-Benson, Maloney e Borning 1990] é um representante típico de sistema de propagação local. Ele resolve restrições de múltiplas maneiras (permite mais de um método para uma restrição) com uma variável de saída. O *DeltaBlue* armazena a solução corrente na forma de um grafo, o qual descreve como recompor os valores para as variáveis na ordem de satisfação de todas as restrições possíveis. No

⁶é uma forma canônica que resulta em equações ordenadas produzindo uma solução.

grafo cada vértice representa uma variável, os arcos representam restrições, rotulados com a sua força que pode ser fraco (weak), forte (strong) ou requerido (required). O *DeltaBlue* suporta planejamento separado e execução de estágios. Dado um grafo de restrições, o algoritmo pode ser usado para encontrar um plano para re-satisfazer as restrições. Durante o estágio de planejamento, o *DeltaBlue* constrói incrementalmente a solução do grafo por adição de restrições. A idéia fundamental do *DeltaBlue* é associar uma informação extra, a força *walkabout*, às variáveis restringidas. Então a solução do grafo pode ser atualizada incrementalmente quando uma nova restrição é adicionada ou removida sem examinar, em média, mais que uma pequena fração do total das restrições hierárquicas. A força de *walkabout* é a mais fraca das forças da restrição corrente determinando a variável e é, também, a mais fraca entre todas as saídas potenciais desta restrição (se uma variável não é determinada por qualquer restrição, então a força de *walkabout* é definida como fraca). O *DeltaBlue* tem duas limitações: ciclos de restrições são proibidos e os métodos usados para satisfazer uma restrição podem ter apenas uma saída.

O *SkyBlue* [Sannella 1994] é o sucessor do *DeltaBlue* com algumas vantagens. Ele permite que ciclos de restrições possam ser construídos (embora o *SkyBlue* não seja capaz de satisfazer qualquer tipo de ciclo) e suporta múltipla saída. O *SkyBlue* utiliza a mesma idéia do algoritmo *DeltaBlue* construindo a rede de restrições (agora chamado um método grafo) e usando a noção generalizada da força *walkabout* para recomputar apenas a pequena fração do grafo depois de adicionar ou remover uma restrição. Entretanto, ele requer no pior caso tempo exponencial para satisfazer sistema de restrições de múltipla-saídas [Zanden 1996].

O *INCES* [Lamounier 1996] representa um conjunto de restrições de um projeto (restrições geométricas e restrições de engenharia) em um grafo de equações chamado de *Equation Graph* - *EG*. Neste grafo, os vértices representam as variáveis e os arcos as equações. O *EG* é usado para representar e manter a atual sequência de satisfação de restrições do desenho com equações lineares ou não lineares. Quando uma nova restrição é inserida no projeto, o algoritmo atualiza o *EG* através de técnicas de propagação local, sempre objetivando a triangularização do sistema. Quando esta triangularização não é possível, devido a flexibilidade provida pelo algoritmo, um sistema de equações (equações que precisam ser resolvidas simultaneamente, também chamado ciclo de equações) é automaticamente identificado. Neste caso, o algoritmo invoca um

método numérico (Newton-Raphson) para solucionar localmente o ciclo de equações, sem causar nenhum distúrbio no grafo como um todo. Isto permite um projeto com um maior grau de interatividade, uma vez que apenas um percentual reduzido do *EG* é afetado durante a inserção de uma nova restrição.

2.2.2 Abordagem baseada na construção geométrica

Na abordagem baseada na construção geométrica, as restrições não são representadas por equações, ao invés disto um conjunto de passos geométricos é utilizado para ir construindo a geometria. Cada nova entidade geométrica é posicionada em relação à outra entidade existente no desenho, através de transformações geométricas (rotação, translação e escala). Estas transformações consomem graus de liberdade (gls) das entidades envolvidas. Embora esta abordagem seja reconhecida como possuidora de interatividade, o processo de re-satisfação de restrições pode obstruir o “feedback” imediato para o projetista quando estiver tratando com um grande número de restrições. Além disso, esta abordagem não possui ferramentas para suportar e satisfazer as restrições de engenharia [Brunkhart 1994]. As técnicas desenvolvidas nesta abordagem são divididas em duas categorias principais: *técnicas baseadas em regras e em grafos*.

Técnicas baseadas em regras

Sistemas baseados em regras [Abdennadher e Rigotti 2004, Brüderlin 1987] usam um mecanismo de controle para indicar onde e como as regras devem ser aplicadas e reescritas a fim de construir a geometria .

Embora a abordagem de construção geométrica baseada em regras seja mais rápida em relação às técnicas numéricas e simbólicas da abordagem baseada em equações, ela ainda consome um tempo excessivo para satisfazer uma seqüência de restrições através de procuras e satisfações das regras [Hsu et al. 1997].

Outros exemplos de sistemas de restrições que utilizam estas técnicas podem ser encontradas nas referências [Joan-Arinyo e Soto-Riera 1999, Joan-Arinyo et al. 2002].

Técnicas baseada em grafos

Nesta técnica, um grafo é usado para representar o conjunto de restrições. Os vértices do grafo representam entidades geométricas e os arcos representam restrições geométricas entre eles. Esta abordagem divide-se em duas categorias: *propagação global* e *propagação local*.

Propagação Global

Na propagação global [Kramer 1991, Bhansali 1995], as restrições geométricas são representadas primeiro em um grafo não orientado. Este grafo é então analisado e um plano de passos de construção geométrica é encontrado. Cada passo de construção é então executado, satisfazendo algebricamente as restrições. *GCE - Geometric Constraint Engine* e *D-Cubed* são exemplos de solucionadores de restrições baseados em propagação global dentro da abordagem construção geométrica.

O *GCE* [Kramer 1994] baseia-se na *Análise dos Graus de Liberdade* proposta por Kramer que é uma técnica capaz de automaticamente encontrar uma sucessão de ações para satisfazer um conjunto de determinadas restrições geométricas. Originalmente, a *Análise dos Graus de Liberdade* é restrita ao domínio da cinemática (estudo da posição, deslocamento, rotação, velocidade e aceleração). Entretanto, esta análise, pode também ser utilizada em outros domínios relacionados com a geometria, tais como: esboço de desenhos, modelamento de objetos e análise de tolerância.

A solução puramente geométrica não envolve equações; ao invés disso, restrições são satisfeitas por ações. Para satisfazer uma restrição geométrica, os graus de liberdade de uma entidade geométrica são consumidos através de transformações geométricas. São usadas duas operações fundamentais para satisfazer as restrições binárias: *Análise de Ação* e *Análise Local*. A *Análise de Ação* procura aquelas restrições onde uma das entidades geométricas está “suficientemente fixa” de forma que a outra entidade geométrica possa ser movida para satisfazer a restrição. Se o conceito de “suficientemente fixa” não pode ser aplicado, o algoritmo tenta satisfazer a restrição por *Análise Local*. A *Análise Local* identifica localmente a intersecção dos lugares geométricos de duas entidades parcialmente restringidas a fim de satisfazer a restrição específica entre elas. Por exemplo, um segmento de reta que possui um de seus pontos finais fixos, só pode movimentar numa trajetória circular, devido a sua liberdade de rotação. Neste

segmento, translações não podem ser aplicadas. Para ilustrar a abordagem de Kramer, considere o seguinte exemplo (Figura 2.2(a)).

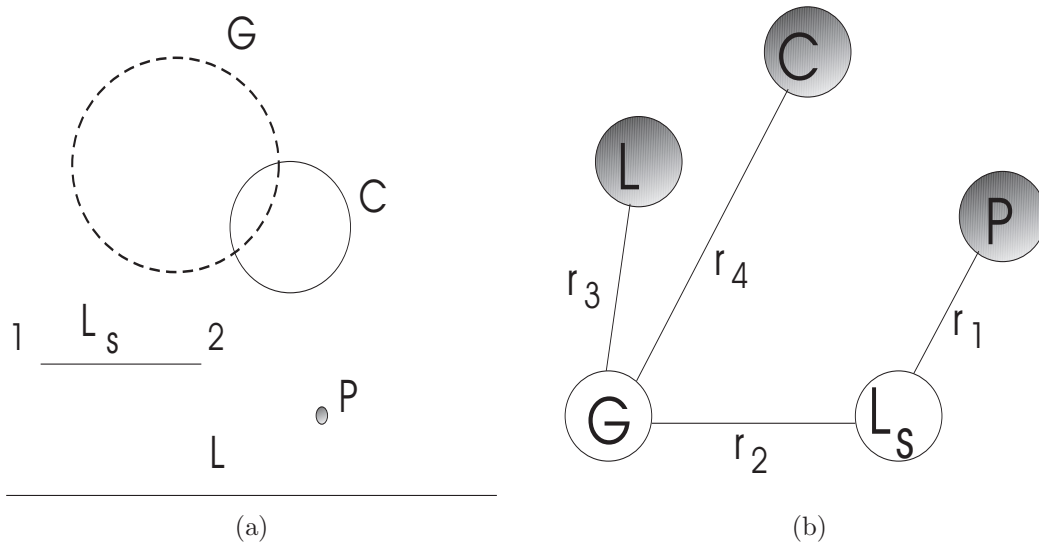


Figura 2.2: (a) Um problema de restrições geométricas e sua (b) representação em grafo.

A Figura 2.2(a) apresenta um conjunto de entidades com a seguinte configuração:

- Uma circunferência C com posição e raio fixos;
- Uma reta L com posição e orientação fixas;
- Um ponto P fixo;
- Um segmento de reta L_s com comprimento fixo e livre para girar e transladar;
- Uma circunferência G livre para transladar e mudar o seu raio.

As restrições geométricas a serem resolvidas são:

- r_1 : $\text{dist:ponto-ponto}(\text{end1}(L_s), P, 0)$ (A distância do ponto extremo 1 de L_s ao ponto P é 0);
- r_2 : $\text{dist:ponto-ponto}(\text{end2}(L_s), \text{Centro}(G), 0)$ (A distância do ponto extremo 2 de L_s ao centro da circunferência G é 0);
- r_3 : $\text{dist:reta-circunf}(L, G, 0)$ (A distância da reta L à circunferência G é 0);
- r_4 : $\text{dist: circunf-circunf}(C, G, 0)$ (A distância da circunferência G à circunferência C é 0).

A Figura 2.2(b) mostra a representação em grafo para este problema. Os vértices cinzas representam entidades geométricas “suficientemente fixas” (fixas no plano). As restrições geométricas são os arcos no grafo. O sistema inicia percorrendo o grafo procurando por restrições que podem ser resolvidas usando a *Análise de Ação*. As restrições r1, r3 e r4 são assim identificadas e satisfeitas nesta ordem, sendo P, L e C as entidades geométricas “aterradas” as outras são movidas a fim de satisfazer cada restrição. A restrição r2 não pode ser satisfeita por *Análise de Ação* devido a L_s e G serem parcialmente restringidas e, portanto, não são “suficientemente fixas” uma em relação à outra. Neste caso, utiliza-se a *Análise Local*. De acordo com os graus de liberdade, o lugar geométrico do segmento de reta L_s é um círculo Enquanto que, o lugar geométrico para a circunferência G é uma parábola. A intersecção entre estes dois lugares geométricos é então determinada. Como há múltiplas intersecções, o sistema requer do usuário a escolha de uma delas. Novamente, a *Análise de Ação* atua para mover L_s e G em direção a solução escolhida, que fixa ambos. Para implementar o método *Análise de Ação* e o método *Análise Local*, Kramer propôs um conjunto de rotinas especialistas chamadas de planos de fragmentos. Estas rotinas especificam como a configuração de um conjunto de corpos rígidos deve ser alterada para satisfazerem um conjunto de restrições. O principal problema desta técnica é a dificuldade para escrever planos de fragmentos para cada problema geométrico específico.

D-Cubed é um sistema *CAD* comercial que possui um gerenciador dimensional de restrições baseado no algoritmo de [Owen 1991]. O algoritmo consiste em dividir o grafo de restrições em pequenos subgrafos que são resolvido em um tempo quadrático e combinando as soluções na solução final.

Propagação Local

Na técnica por propagação local [Kwaiter, Gaildrat e Caubet 1997], as restrições são satisfeitas a cada momento, de acordo com a seqüência de comandos do projetista. Toda restrição geométrica inserida é localmente acomodada no grafo, atualizando a solução. As restrições sempre são especificadas da geometria conhecida para a desconhecida e são resolvidas incrementalmente, ou seja, estendendo a solução parcial em direção à completa [Silva e Lamounier 2002].

Baseado nesta abordagem, Rossignac propõe uma técnica por meio da qual representações de CSG são especificadas através de vértices em um grafo, onde cada

nódulo representa uma primitiva sólida e os arcos são restrições entre estas primitivas [Rossignac 1986]. As restrições geométricas são impostas sobre os modelos sólidos CSG que são avaliados independentemente por transformações operacionais de acordo com a ordem de especificação do usuário. Embora esta técnica evita o problema de converter as restrições em um conjunto grande de equações, acarreta dois problemas:

1. O usuário é responsável por encontrar a sucessão de operações como também lidar com conflitos entre restrições;
2. A técnica não é capaz de resolver problemas onde devem ser satisfeitas muitas restrições simultaneamente (ciclo de restrições).

Fa [Fa, Fernando e Dew 1993] estendeu a abordagem feita por Rossignac para suportar modelamento em ambientes virtuais. Ele apresentou um modelador de sólidos chamado ICBSM (Interactive Constraint-based Solid Modeler), o qual baseia-se na satisfação local de restrições durante a inserção de uma nova restrição. Nesta abordagem, é utilizado um grafo orientado representando o problema de restrição. As restrições geométricas são automaticamente reconhecidas através de manipulação direta com o ambiente virtual. Uma técnica chamada de Movimento Permitido é utilizada para satisfazer as restrições e manipular modelos sub-restringidos de acordo com os seus g.l.'s. Quando uma entidade geométrica está sendo manipulada, ela propaga a transformação para todos os vértices filhos, de acordo com a dependência estabelecida pela direção do arco. A Figura 2.3 ilustra o princípio do ICBSM.

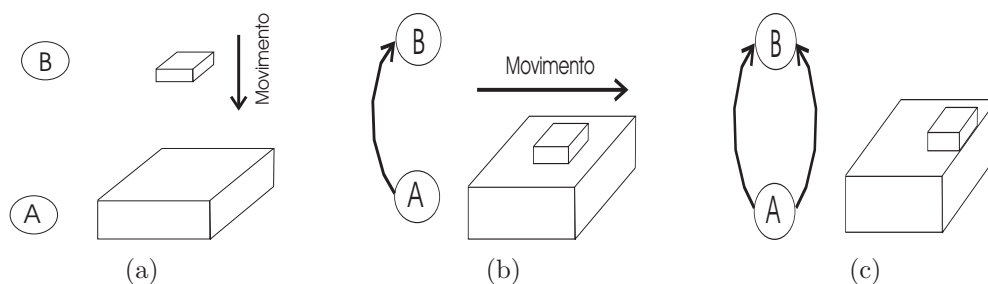


Figura 2.3: Integração das restrições geométricas e manipulação direta pelo ICBSM.

Nota-se na figura que em (a) o usuário pode arrastar e manipular o bloco B, pois este bloco é livre para transladar e girar no espaço. O usuário especificou uma restrição *Against* (contato entre superfícies planas), entre a face de baixo do bloco B e a face de cima do bloco A, movendo o bloco B na direção do bloco A. A restrição *Against* é

automaticamente reconhecida quando há uma distância ínfima entre as duas superfícies. Esta restrição é representada no grafo orientado como mostra a Figura 2.3(b). Neste momento, os graus de liberdade do bloco B são recalculados e o Movimento Permitido é capturado e mantido no grafo. Para o bloco B, neste caso, os movimentos permitidos são a translação no plano (parte superior de A) e a rotação sobre qualquer eixo normal a este plano. Se o usuário translada o bloco A, este movimento é propagado para o bloco B. Em seguida, movendo o bloco B para a direita, o ICBSM reconhece a restrição *Coincidência* (intersecção de dois planos em 3D) que pode ser imposta entre as faces direitas de ambos os blocos. Assim, a geometria final e o grafo orientado são novamente atualizados como mostra a Figura 2.3(c).

Pela introdução de “movimento permitido” e transformações em corpos rígidos, Fa evita atualizar a geometria através de técnicas numérica e/ou algébricas. Isto provê uma solução de restrições geométricas mais rápida. Entretanto, o ICBSM de Fa não é capaz de resolver um ciclo de restrições quando simula um mecanismo fechado em loop. Além disso, como já mencionado anteriormente, estas abordagens não são capazes de representar restrições de engenharia e, portanto, o uso destas não é adequado nas fases iniciais de projetos.

2.2.3 Comparação entre Sistemas baseados em Restrições

Para melhor identificar as diferenças e as similaridades das abordagens analisadas foi construído a Tabela 2.1 com características importantes em um sistema baseado em restrições e de interesse da tese. Entretanto, os sistemas citados possuem características como, por exemplo, resolução de equações não-lineares e resolução de ciclos de restrições que não foram consideradas para análise.

Os sistemas analisados como Dimension ⁷, GCE ⁸, D-Cubed ⁹, SkyBlue ¹⁰ e INCES ¹¹ são exemplos de sistemas baseados em restrições. O cálculo da complexidade dos algoritmos é baseado no número de elementos geométricos n e o no número de restrições m .

⁷usa a abordagem baseada em *Equações através de métodos numéricos*

⁸o sistema *Geometric Constraint Engine* utiliza a abordagem baseada na *construção geométrica através das técnicas de Grafos com Propagação Global*

⁹baseado na *construção geométrica usando Grafos com Propagação Global*

¹⁰baseado em *Equações usando Grafos com Propagação Local*

¹¹o sistema *Incremental Constraint Equation Solver* baseia-se em *Equações usando Grafos com Propagação Local*

Tabela 2.1: Características de Sistemas baseados em restrições

	Dimension	GCE	D-Cubed	SkyBlue	INCES
Referência	Gossard 1982	Kramer 1994	Owen 1991	Sannella 1994	Lamounier 1996
Complexidade	$O(n^3)$	$O(nm)$	$O(n^2)$	$O(m^2)$	$O(n^3)$
Incremental	×	×	×	✓	✓
Manipulação Direta	×	×	×	✓	✓

A maioria dos sistemas são aplicações para projetos na área de engenharia civil e mecânica devido a forte ênfase no modelamento geométrico. Assim, a adaptação destes sistemas para projetos de instalações elétricas, certamente, exigiria uma adequação à natureza das restrições consideradas neste caso.

A próxima seção trata da questão de ferramentas comerciais para a área específica de instalações elétricas, e analisa as suas principais características de funcionamento objetivando a construções de projetos para instalações elétricas residenciais.

2.3 Ferramentas *CAD/CAE* Comerciais

Esta seção apresenta algumas ferramentas comerciais usadas para desenvolver e suportar projetos de instalações elétricas. Tais ferramentas, que possuem uma relação direta com a proposta desta tese, são descritas através do seu funcionamento de acordo com os seus autores. Por fim, uma tabela destaca a presença de características importantes em um sistema *CAD/CAE*, em cada uma das ferramentas apresentadas.

2.3.1 Autopower

Aplicativo para o AutoCADTM, é desenvolvido pela Autoenge Brasil [Autoenge 2005]. Este sistema é bastante utilizado por engenheiros eletricitas de acordo com a revista

CADESIGN [Moreira 2003]. A Figura 2.4 mostra uma tela do AutoPower (versão 4.0).

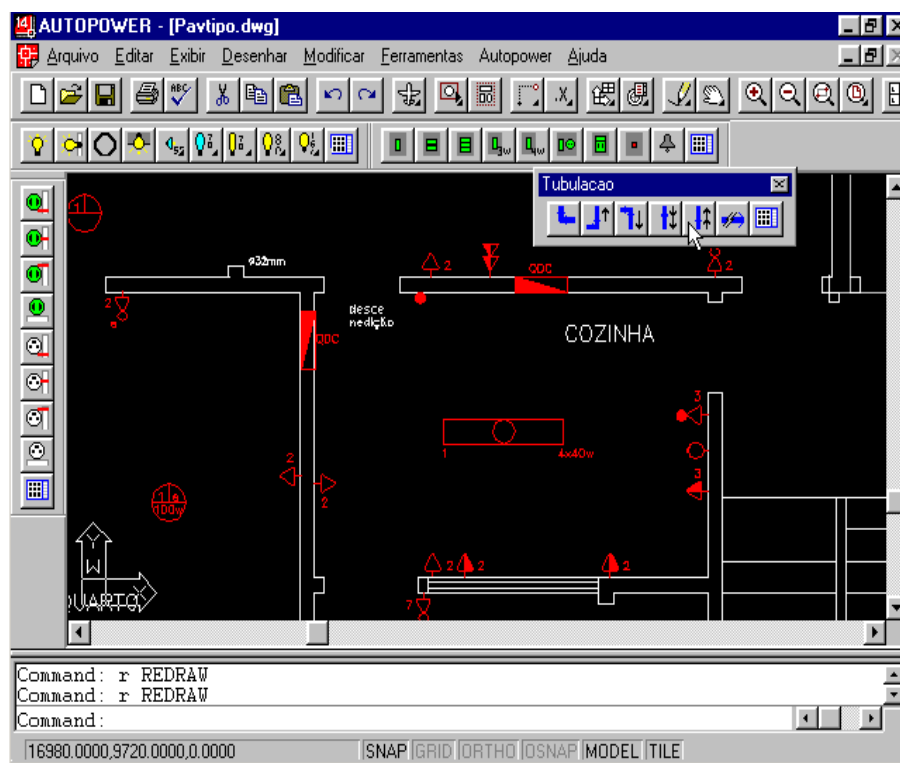


Figura 2.4: Tela do software Autopower. Fonte: [Autoenge 2005]

Este software possui uma rica biblioteca de símbolos para componentes de instalações elétricas, que podem ser inseridos diretamente no desenho. Sempre que for inserido um símbolo, uma caixa de diálogo irá aparecer para que sejam informados os parâmetros do componente inserido, como por exemplo número do circuito, quadro de distribuição, potência, fator de potência, altura do piso, tensão, rendimento, e se for necessário a sua descrição. O usuário poderá escolher um circuito existente durante a inserção e acompanhar a potência ativa em W (Watts) e a potência aparente em VA (Volt Ampere). Os parâmetros são inerentes a cada símbolo, isto é, parâmetros importantes em um símbolo podem não ser em outro.

O quadro de carga que também é um símbolo elétrico pode ser inserido manualmente ou automaticamente nas proximidades do centro de carga. O centro de carga é calculado para um quadro com a seleção do conjunto de cargas ligados a ele.

Para o traçado de tubulações elétrica, o usuário, após configurar o sistema com relação a escolha do conduto e das suas dimensões iniciais, “clica” em desenhar e escolhe um ponto elétrico para iniciar o traçado da tubulação e na sequência o sistema vai pedindo o próximo ponto elétrico e seus parâmetros (teto, piso e parede) informando para onde a tubulação seguirá, trabalho este que deve ser repetido manualmente até

traçar toda a tubulação necessária para a instalação.

2.3.2 Lumine

Fabricado pela AltoQi [Altoqi 2004], este sistema utiliza objetos gráficos, chamados de elementos elétricos, para representar *eletrodutos* e caixas (Figura 2.5).

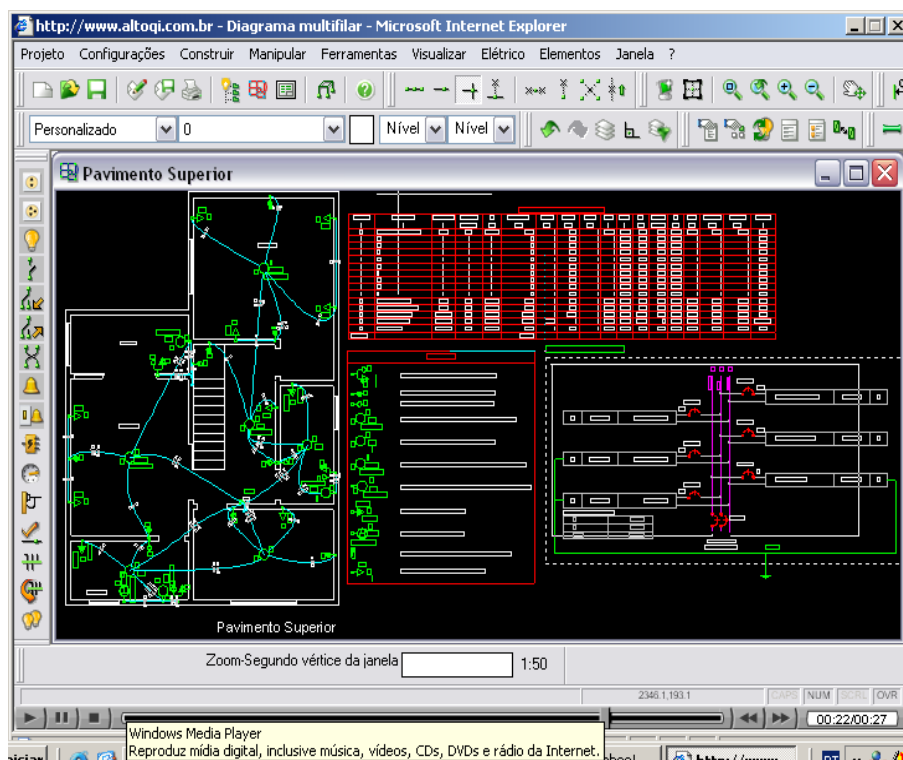


Figura 2.5: Software AltoQi. Fonte: [Altoqi 2004]

A partir da planta baixa definem-se os pontos de utilização no projeto elétrico. Deve-se definir, em cada cômodo da edificação, o tipo e posição das lâmpadas utilizadas, a forma de comando dessas lâmpadas e a quantidade e posição das tomadas. A forma de se fazer o projeto elétrico fica a critério do engenheiro projetista utilizando-se dos recursos que o software possui. De acordo com os exemplos anexos ao software uma seqüência natural seria a definição de todas as lâmpadas do projeto com os seus respectivos interruptores e, em seguida, as tomadas. A cada inserção de um destes pontos o projetista deve informar os itens Circuito, Rede, Posição e Elevação em uma caixa de diálogo.

Junto a cada ponto deve ser escolhida a peça (luminária, caixa com tomada etc) a ser efetivamente utilizada para representá-la. À medida que se inserem peças o programa automaticamente as lista em uma nova inserção facilitando assim o trabalho

do projetista.

Após definir os circuitos, pode-se lançar o quadro de distribuição que é um tipo especial de conexão, com a função de abrigar e organizar os disjuntores dos diversos circuitos elétricos da instalação. Neste ponto do projeto, faz-se o traçado manual da tubulação entre os pontos do projeto. Os condutos (eletrodutos) terão seus diâmetros dimensionados corretamente após o dimensionamento de toda a fiação interna aos mesmos. Quando do dimensionamento dos circuitos é possível inserir automaticamente toda a fiação interna a cada conduto (processo manual sem controle de consistências).

2.3.3 CAD/Elet

O sistema CAD/EletTM[VipTec 2005], desenvolvido como aplicativo para o AutoCADTM, por utilizar as técnicas mais modernas de programação, é uma poderosa ferramenta para os profissionais projetistas de instalações elétricas. O CAD/Elet sendo utilizado durante a elaboração de um projeto é mostrado na Figura 2.6.

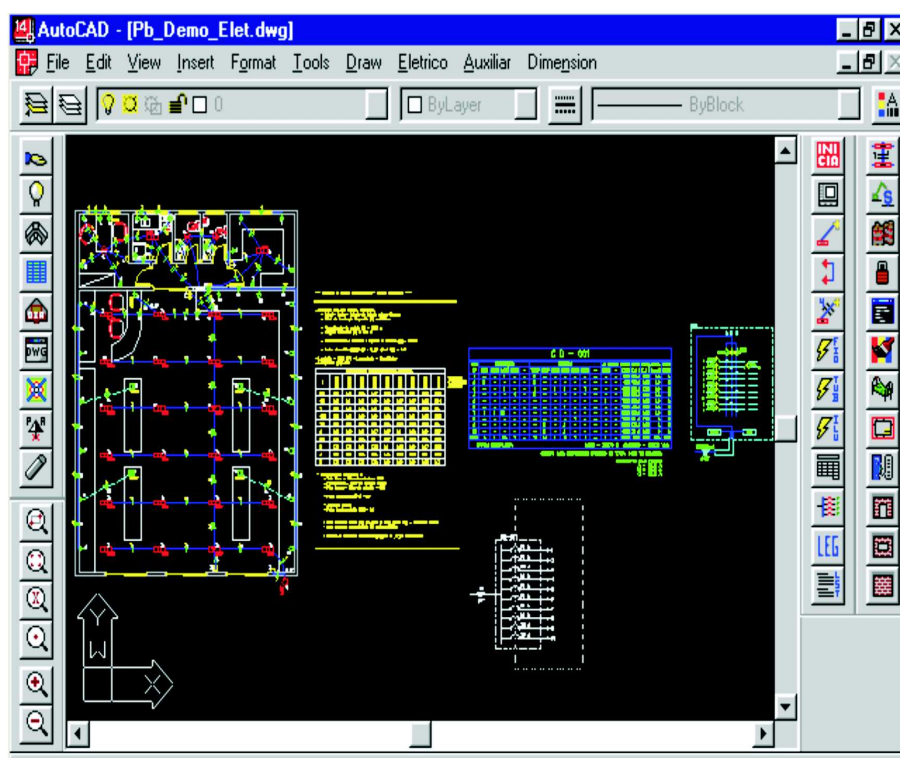


Figura 2.6: Projeto elétrico no CAD/Elet. Fonte: [VipTec 2005]

Este sistema funciona de maneira semelhante ao Autopower (e todos os demais aplicativos para o AutoCAD) com a peculiaridade do projetista de uma região distinta do país poder alterar a biblioteca de dados que seja mais conveniente para o

projeto. Visando o conforto do usuário o programa foi desenvolvido mantendo-se todos os comandos do AutoCAD disponíveis, e incluindo-se um menu de Ajuda On Line que permite acesso a maioria das informações necessárias sem sair do programa e sem consultar o manual. Além disso, estão disponíveis tutoriais que permitem ao usuário o aprendizado de acordo com a sua conveniência reduzindo a necessidade de deslocamento para treinamento resultando em redução de custos para o mesmo. Entretanto, o sistema não automatiza tarefas a fim de diminuir o trabalho manual e repetitivo.

2.3.4 PRO-Elétrica

O Pro-Elétrica é um software da [Multiplus 2005] empresa que desenvolve diversos produtos para projetos de engenharia. Um exemplo de parte de um projeto elaborado neste software é apresentado na Figura 2.7.

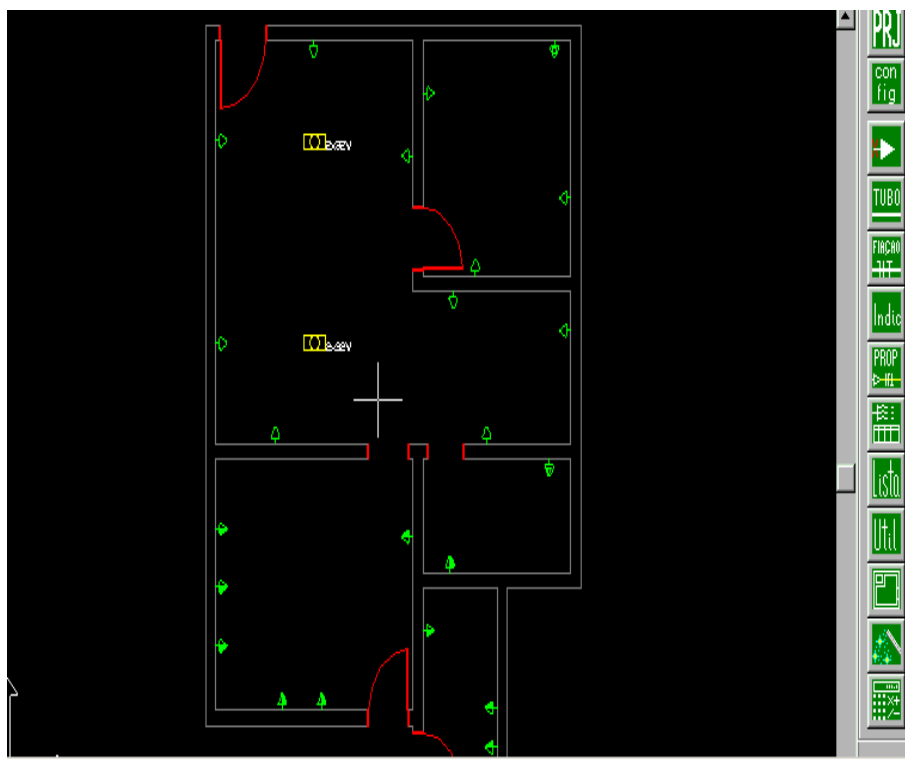


Figura 2.7: Projeto elétrico desenvolvido no PRO-Elétrica. Fonte: [Multiplus 2005]

Trata-se de um aplicativo do AutoCADTM. O usuário lança um projeto completo no computador, chamado Projeto Virtual, com fiação, componentes e eletrodutos para o edifício todo. Os componentes são considerados como Objetos Virtuais (e não apenas linhas e símbolos como no CAD puro) conectados entre si. O Projeto Virtual simula o funcionamento da instalação no computador, como se ela transportasse energia elétrica

nos circuitos virtuais. Entretanto, tal característica não é exatamente a de um sistema de RV (Realidade Virtual) e, o projeto ainda é realizado manualmente de forma similar aos softwares anteriormente citados.

2.3.5 Comparação entre Sistemas *CAD* Comerciais

Para melhor identificar as diferenças e as similaridades das ferramentas analisadas foi construído uma tabela com características importantes para um software destinado a profissionais/estudantes de instalações elétricas.

A Tabela 2.2 compara algumas características por meio de recursos importantes relacionados com a funcionalidade e usabilidade dos sistemas, dando ênfase às diferenças relacionadas aos propósitos deste trabalho. Outras características contempladas nos sistemas analisados não foram destacadas por fugir do foco desta tese. As negações das propriedades foram encontradas na literatura estudada, não sendo identificado atualizações destas propriedades durante a escrita desta tese.

A descrição de cada característica é destacada:

Visualização 3D Alguns softwares apresentam detalhes do projeto em 3D, outros apesar de afirmar que trata-se de um projeto virtual, por exemplo o *PRO-Elétrica*, não possibilita grande interação, navegação e sensação de imersão.

Two Way É a comunicação bi-direcional entre projetos 2D e 3D. A manipulação de objetos em um ambiente é simultaneamente refletido no outro.

Seqüência didática A seqüência de passos para a construção de um projeto de instalação elétrica compatível com o que normalmente é apresentado nos livros da área.

Lançamento automático de eletrodutos Durante a construção do projeto o sistema já lança eletrodutos interligando cargas para posterior traçado da fiação dos circuitos

Cálculo do menor caminho Todo o cabeamento da instalação é minimizado em função da distância das cargas de cada circuito com relação ao quadro de distribuição

Dimensionamento automático Após a formação dos circuitos, a seção dos condutores e eletrodutos é continuamente atualizada com inserção, remoção e/ou

alteração de cargas elétricas.

Construção incremental Partes do projeto sendo atualizadas e/ou construídas durante uma ação do usuário. Isto é, ação do usuário como uma inserção de uma tomada provoca a construção de um eletroduto interligando esta tomada a um outro ponto existente na instalação.

Vínculo com o AutoCAD Os sistemas para a elaboração do projeto elétrico funcionam como um aplicativo (extensão) do AutoCAD que é o software base de desenvolvimento.

Detecção de obstáculos Durante a construção do projeto elétrico, o sistema detecta possíveis obstáculos devido a outros projetos (estrutural, hidráulico, arquitetônico). Isto possibilita ao autor de cada projeto a correção de interferências do seu projeto em outro.

Tabela 2.2: Características de Ferramentas CAD para Instalações Elétricas

	Lumine	CAD/Elet	PRO-Elétrica	Autopower
Visualização 3D	✓	×	✓	×
Two-way	×	×	×	×
Seqüência didática	×	×	×	×
Lançamento automático de eletrodutos	×	×	×	×
Cálculo do menor caminho	×	×	×	×
Dimensionamento automático	✓	✓	✓	✓
Construção incremental	✓	×	×	×
Vínculo com o AutoCAD	×	✓	✓	✓
Deteção de Obstáculos	×	×	×	×

Alguns sistemas trabalham com o lançamento semi-automático de fiação, mas para isto considera lançados os eletrodutos que geralmente é feito manualmente pelo engenheiro projetista.

Como pode ser observado, a tabela não indica a impossibilidade, mas a inexistência de um sistema que atenda simultaneamente a todas as características realçadas, o que motivou a especificação de uma solução que contemple tais propósitos simultaneamente. Tais características surgiram a partir dos problemas observados durante o estudo das ferramentas relacionadas. Por esta razão, o capítulo 4 desta tese analisa e propõe o projeto de um sistema computacional para atender simultaneamente todos os requisitos destacados nas linhas da Tabela 2.2.

2.4 Considerações Finais

Este capítulo apresentou um estudo teórico de projetos baseados em restrições e uma análise das características e limitações de ferramentas *CAD* utilizadas em projetos de instalações elétricas. Diante do estudo realizado, percebe-se que existe uma demanda para sistemas *CAD* que resolvam os problemas apresentados de forma mais eficiente e possibilite uma associação mais natural de visualização 3D para plantas baixas. Conclui-se que a abordagem por propagação local baseada em grafos possibilita uma maior interatividade com o projetista, sendo indicada para suprir limitações apresentadas nas ferramentas *CAD* comerciais analisadas. O próximo capítulo apresenta detalhes algorítmicos de uma ferramenta *CAD* baseada em restrições e aplicada à construção e análise de circuitos elétricos. Esta ferramenta inspirou a arquitetura do sistema proposto neste trabalho.

Capítulo 3

Circuitos Elétricos baseados em Restrições

3.1 Introdução

Este capítulo mostra como o paradigma de restrições suporta projetos de circuitos elétricos. As técnicas utilizadas baseiam-se em algoritmos incrementais de satisfação de restrições encontrado em [Silva e Lamounier 2002] e apresentados nas seções 1.5 e 2.2 desta tese.

Um sistema protótipo foi desenvolvido e utiliza de uma representação em grafo na construção de desenhos esquemáticos de circuitos elétricos que permite a satisfação incremental de restrições. Os métodos utilizados para satisfação das restrições são apresentados e discutidos. O método computacional para a análise do circuito formado é também apresentado e avaliado a partir do grafo de restrições. O capítulo discute, também, como a representação em grafo permite explorar os graus de liberdade de uma entidade geométrica suportando, interativamente, manipulações diretas pelo usuário.

3.2 Representação de Restrições

Um desenho esquemático de circuitos elétricos é composto de primitivas elétricas (componentes de circuitos) interligadas entre si. Cada componente de circuito (resis-

tores, fontes de tensão, indutores etc) possui uma característica elétrica (tensão versus corrente) íntinseca [Hayt e Kemmerly 1975, Alexander e Sadiku 2003]. A característica do resistor, chamada de *resistência*, é a oposição à passagem de corrente elétrica, enquanto no indutor, a *indutância* é a oposição à variação da corrente no tempo.

Um grafo, chamado de grafo de restrições, representa o desenho na memória do computador. Seja, por exemplo, um resistor R_1 como o primeiro componente inserido em um desenho elétrico. Inicialmente não existe nenhuma restrição sobre este componente e lhe é conferido os três graus de liberdade no plano 2D do desenho. No grafo de restrições, R_1 é representado usando dois vértices e um arco. Os vértices V_1 e V_2 representam as extremidades de R_1 sujeitas a um potencial elétrico, dado em volts, quando o circuito estiver sendo analisado (simulado). O arco, que interliga estes dois vértices, representa a característica de R_1 , a sua resistência, e o sentido e módulo da corrente elétrica, em Ampère, durante a análise do circuito. A Figura 3.1(a) mostra R_1 no plano de desenho e a Figura 3.1(b) sua representação em grafo.

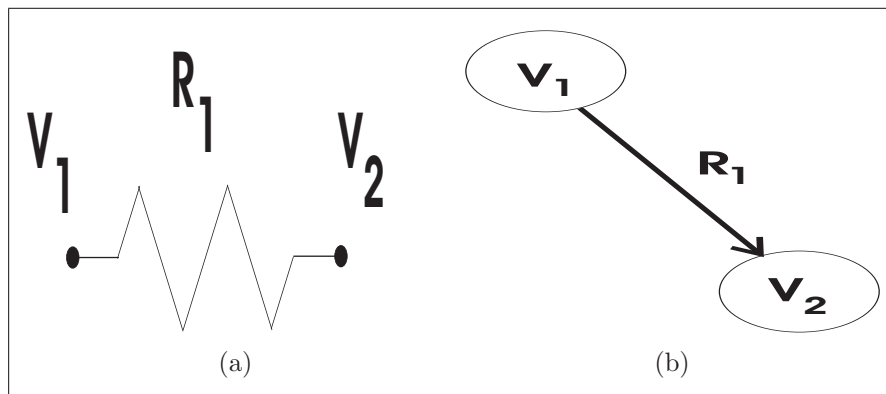


Figura 3.1: Componente de circuito no desenho e no grafo.

Através de ligações entre os componentes e/ou partes de circuito já interligados é que se forma um circuito elétrico completo (Figura 3.2) que poderá vir a ser simulado. Estas ligações são representadas como restrições do grafo e serão explicadas na próxima seção.

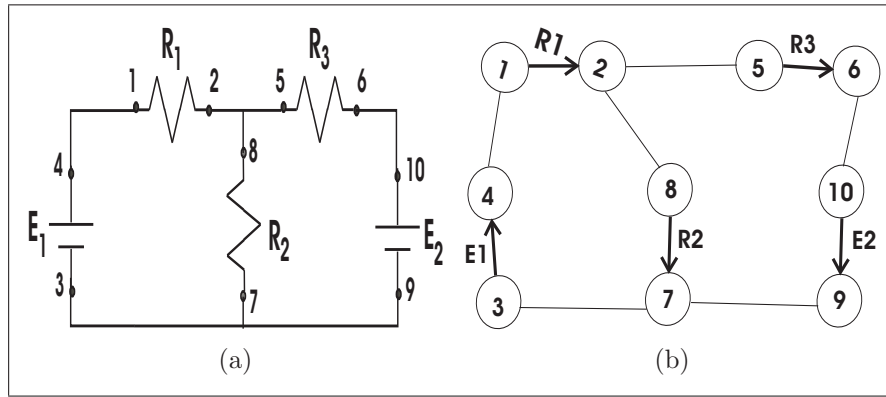


Figura 3.2: Circuito completo e o grafo para simulação.

3.3 Satisfação de Restrições Elétricas

Esta seção mostra como restrições são satisfeitas incrementalmente em um projeto de circuito elétrico. Considere a construção de um circuito onde o engenheiro projetista já tenha inserido dois resistores R_1 e R_2 . Conforme é mostrado na Figura 3.3 as representações das resistências destes resistores no grafo são respectivamente os arcos V_1V_2 e V_3V_4 . Os vértices do grafo correspondem às extremidades dos resistores com tensão inicial igual a zero. Em seguida, é estabelecida uma ligação entre uma extremidade de R_1 e uma extremidade de R_2 . Esta ligação representa no grafo uma restrição *conexão* e estabelece uma ddp (diferença de potencial) nula entre os ponto ligados. A Figura 3.3 ilustra todo este processo e marca o início de um projeto de circuitos elétricos: a ligação entre dois componentes.

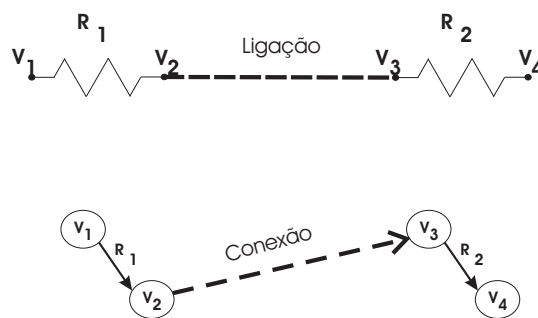


Figura 3.3: Ligação entre dois resistores e a representação no grafo.

A Figura 3.4 mostra um circuito completo formado pelas restrições conexões impostas pelo projetista, entre os conectores (extremidades) dos componentes R_1 , R_2 e E_1 . O grafo evidencia as restrições *conexões* na formação do circuito.

A restrição conexão não consome $g.l.$'s (graus de liberdade) da geometria formada. Ao invés disto, ela indica que geometricamente partes do circuito estão ligadas e de-

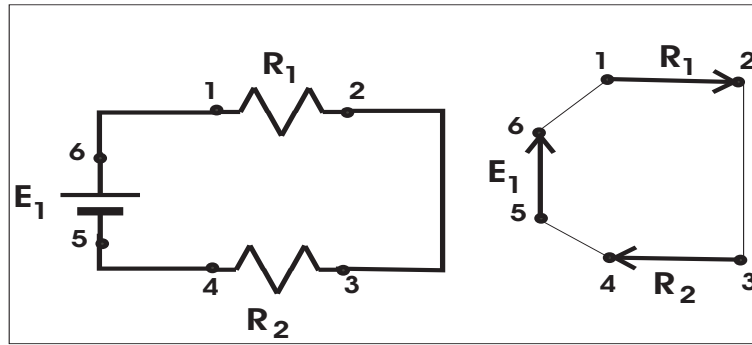


Figura 3.4: Formação de um circuito através das *conexões*.

vem manter-se como tal. Suponha que o projetista mova o resistor R_2 para uma nova posição, como está mostrado na Figura 3.5. As conexões deste componente mantêm inalteradas no grafo, mudando apenas as suas trajetórias para refletir esta transformação.

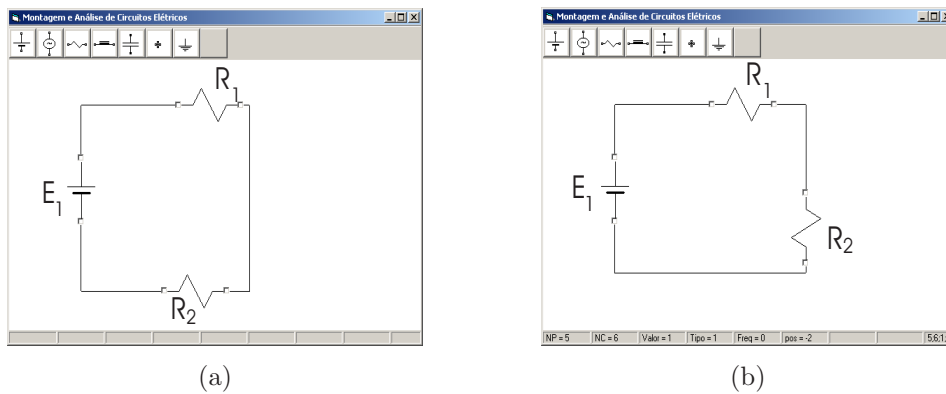


Figura 3.5: A restrição conexão se adapta às transformações geométricas dos componentes.

Análise de Circuitos

O método computacional [Hayt e Kemmerly 1975] empregado é limitado para circuitos elétricos em regime permanente. Para uma análise completa, onde se considera os transitórios, o sistema deveria ser equacionado com variáveis de estados [Alexander e Sadiku 2003], considerando, ainda, um tempo de análise.

Os elementos do grafo de circuitos elétricos são, por convenção, chamados de nó (vértice do grafo) e ramo (arco do grafo). As grandezas elétricas tensão e corrente estão presentes em todo o grafo. No ramo é a restrição elétrica que representa o quociente V por I . Em cada nó é o potencial em volts. Assim, utilizando-se das

duas Leis de Kirchoff: LKC^{12} e LKT^{13} pode-se formular as equações do circuito [Alexander e Sadiku 2003].

Novamente, o grafo do circuito da Figura 3.4 é reproduzido na Figura 3.6 para mostrá-lo simplificado devido a restrição conexão formar apenas uma junção com o mesmo potencial elétrico.

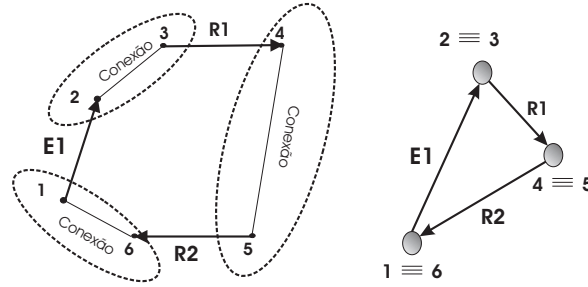


Figura 3.6: Simplificação do Grafo do Circuito para Análise de Circuitos.

Aplicando a LKC (análise nodal) nos nós 2, 4 e 6 do grafo que representa o circuito tem-se:

$$2 : i_{E1} - i_{R1} = 0$$

$$4 : i_{R1} - i_{R2} = 0$$

$$6 : i_{R2} - i_{E1} = 0$$

Percebe-se que a equação originária do nó 6 no exemplo é uma combinação das outras duas equações anteriores e, portanto, pode ser eliminada. De maneira geral, a equação obtida de um dos nós é dependente das outras equações, por isso toma-se $n - 1$ nós. Considera-se um dos nós como o nó referência (potencial zero). Um grafo de n nós e r ramos tem a sua matriz incidência correspondente com $n - 1$ linhas e r colunas. O grafo pode ser descrito completamente usando uma matriz chamada de matriz incidência. Os elementos a_{ij} da matriz A (matriz incidência) são definidos como:

1, se o ramo j sai do nó i ;

-1, se o ramo j entra no nó i ;

0, se o ramo j não incide no nó i .

¹²Lei de Kirchoff para as Correntes: A somatória algébrica das correntes em um nó é igual a zero.

¹³Lei de Kirchoff para as Tensões: A somatória algébrica das tensões em uma malha é igual a zero.

Neste exemplo, A é dada por:

$$A = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ 1 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

Observa-se que a equação matricial 3.1 representa a LKC:

$$A.I = 0 \quad (3.1)$$

onde I representa o vetor corrente de ramos, neste exemplo I é dado por:

$$I = \begin{bmatrix} i_{R1} \\ i_{R2} \\ i_{E1} \end{bmatrix}.$$

A tensão em cada ramo é dada como a diferença de potencial dos seus nós extremos (potencial do nó de partida NP menos o potencial do nó de chegada NC). Assim, a tensão v em um ramo k (entre os nós i e j) qualquer é dada por $v_k = e_i - e_j$. Onde e_i é o potencial no nó I e e_j é o potencial no nó J.

Generalizando para todos os ramos, tem-se uma equação na forma matricial em função da matriz de incidência já determinada.

$$V = A'.E \quad (3.2)$$

Onde:

V é o vetor tensão de ramo;

A' é a transposta da matriz A;

E é o vetor tensão nodal.

No exemplo considerado, esta equação é definida por:

$$V = \begin{bmatrix} -1 & 1 \\ 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} e_2 \\ e_4 \end{bmatrix}$$

Para determinar as equações que relacionam cada ramo a sua tensão e sua corrente, considera-se em um ramo genérico a estrutura mostrada na Figura 3.7.

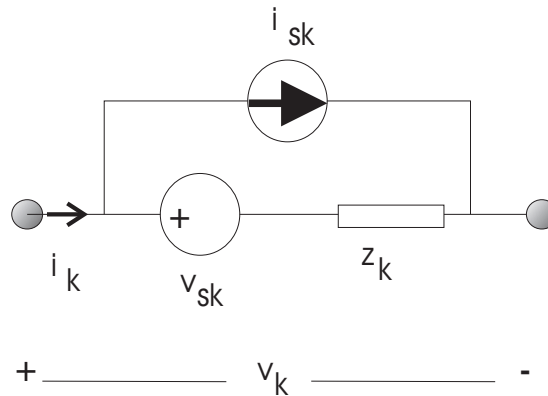


Figura 3.7: Ramo genérico de uma rede qualquer.

O ramo k genérico possui uma fonte de tensão v_{sk} e/ou uma fonte de corrente i_{sk} independentes além de sua impedância de ramo z_k (ou admitância y_k). Equacionando o ramo k , tem-se:

$$v_k = v_{sk} + z_k(i_k - i_{sk}) \text{ ou}$$

$$i_k = y_k(v_k - v_{sk}) + i_{sk}$$

Na forma matricial, para todo o circuito, tem-se:

$$I = Y.(V - V_s) + I_s \quad (3.3)$$

onde I é o vetor corrente de ramo ($r \times 1$), V é o vetor tensão de ramo ($r \times 1$), I_s é o vetor fonte de corrente de ramo ($r \times 1$), V_s é o vetor fonte tensão de ramo ($r \times 1$) e Y é a matriz admitância de ramo ($r \times r$). Rearranjando todas as equações, obtém-se o vetor tensão de nó dado por:

$$E = (A.Y.A')^{-1}.A.(Y.V_s - I_s) \quad (3.4)$$

No processo computacional as matrizes A , Y , V_s e I_s são determinadas diretamente do grafo, os cálculos matriciais iniciam-se na determinação do vetor E pela equação 3.4 e em seguida determina-se V pela equação 3.2 e finalmente determina-se I através da

equação 3.3. Verifica-se, portanto, a determinação da tensão em cada nó e em cada ramo do circuito, além das correntes de ramos.

3.4 Principais Características do Sistema Desenvolvido

O sistema desenvolvido é capaz de executar a análise de circuitos em CC (corrente contínua) e em CA (corrente alternada), podendo conter resistores, indutores, capacitores e fontes de tensão.

A tela do sistema em execução é mostrada na Figura 3.8.

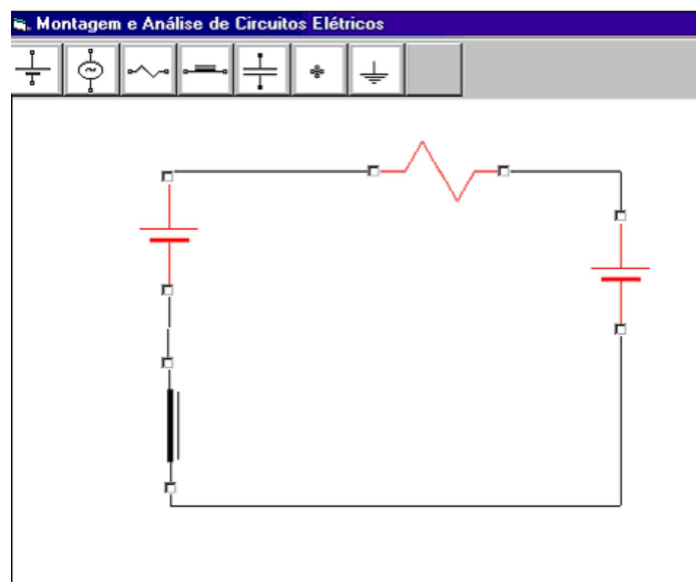


Figura 3.8: Circuito simulando.

As suas principais características incluem:

- Natureza incremental;
- Manipulação direta.

3.4.1 A natureza incremental dos algoritmos

Este aspecto foi avaliado de acordo com a porcentagem de vértices do Grafo de Restrições que é visitado quando uma nova restrição é inserida. A acomodação das

restrições conexões é feita entre dois vértices no grafo com a adição de um arco entre eles, sem a necessidade de re-satisfazer as restrições existentes.

3.4.2 Suporte para manipulações diretas

O suporte para manipulações diretas foi avaliado através da capacidade de movimentação de elementos de um circuito elétrico, onde qualquer um destes elementos (componentes do circuito) pode ser manipulado individualmente. O grafo mantém preservadas as ligações existentes entre os componentes do circuito.

3.4.3 Limitações

O sistema não suporta restrições de engenharia, ou seja, não é possível, por exemplo, inserir equações como as Leis de Kirchoff e Ohm. Isto é, o sistema não suporta uma estrutura que armazena as equações mantendo-as atualizadas mesmo com alterações dos valores das variáveis do circuito. Ao invés disto o sistema chama métodos para atualizar cálculos relacionados à análise de circuitos. Portanto, a solução de um circuito elétrico não é imediata. Quando houver alteração de valores de componentes individuais do próprio circuito, ou quando restrições conexões forem modificadas, uma nova solução não é automaticamente gerada. Isto somente se efetiva após a ação explícita do usuário com o intuito de conhecer a solução atual, fazendo o sistema percorrer o grafo, equacionando novamente o circuito.

A análise de circuitos considera apenas componentes passivos, lineares e invariantes no tempo. Os cálculos são considerados em regime permanente, sem, portanto, levar em consideração transitórios e sinais diferentes dos senoidais e contínuos. A implementação exigiria cálculos matriciais adicionais e utilização de técnicas numéricas para resolução de sistemas de equações diferenciais.

3.5 Resumo e conclusão

Este capítulo apresentou as principais características de um sistema, baseado em restrições, para projetos de diagramas de circuitos elétricos. O desenho do circuito elétrico é representado pelo grafo de restrições que mantém informações suficientes para

a análise do circuito formado. Através da Análise Nodal, os resultados são apresentados na forma de corrente/tensão de ramos e tensão em cada nó presente no circuito.

A construção do projeto, em termos de sua geometria, é incrementalmente atualizada quando uma nova restrição é inserida sem a necessidade de atravessar o grafo re-satisfazendo as restrições existentes, contribuindo assim para um menor custo em termos de tempo de projeto. O próximo capítulo apresenta uma proposta de extensão deste trabalho para suporte de projetos de instalações elétricas.

Capítulo 4

Projetos de Instalações Elétricas baseado em Restrições

4.1 Introdução

Projetar uma instalação elétrica residencial consiste em fornecer ao executor da obra a localização de cada ponto de energia, bem como o dimensionamento de condutores e eletrodutos. As etapas de um projeto de instalação elétrica foram apresentadas na introdução desta tese e o estudo destas mesmas etapas está destacado no Apêndice A. Este capítulo apresenta uma proposta de extensão do paradigma de restrições para projetos de instalações elétricas, a fim de amenizar as limitações encontradas nos atuais sistemas *CAD/CAE*. Nesta proposta, o projeto de instalações elétricas é representado em grafo possibilitando a construção do desenho com a localização dos pontos de energia juntamente com suas conexões como interruptores, eletrodutos e condutores, além de facilitar os cálculos de dimensionamento destas conexões.

4.2 Representação de Restrições

Os circuitos elétricos de uma instalação residencial podem ser representados em um grafo de restrições conforme foi apresentado no Capítulo 3. Estes circuitos podem ser simplificados à medida em que possuem apenas uma fonte de tensão, localizada no

quadro de distribuição, e seus fios, condutores elétricos, podem ser modelados apenas por resistores, conforme demonstrado no Apêndice A.

Na extensão proposta neste trabalho, a representação em grafo de toda a instalação elétrica, incluindo os seus circuitos, tem os seus vértices representando as cargas elétricas, como lâmpadas, interruptores (cargas nulas) e aparelhos eletrodomésticos, e os seus arcos representando os eletrodutos que interliga cada duas cargas.

A Figura 4.1(a) mostra parte de uma instalação elétrica contendo cargas de iluminação (*I a VI - circuito 1*) e de força (*a e b - circuito 2*). A Figura 4.1(b) mostra a representação do grafo onde os vértices são as cargas elétricas e os arcos são os eletrodutos. Os eletrodutos contém informações relativas aos seus circuitos internos que por sua vez possuem informações dos condutores que levam energia para o conjunto de cargas elétricas.

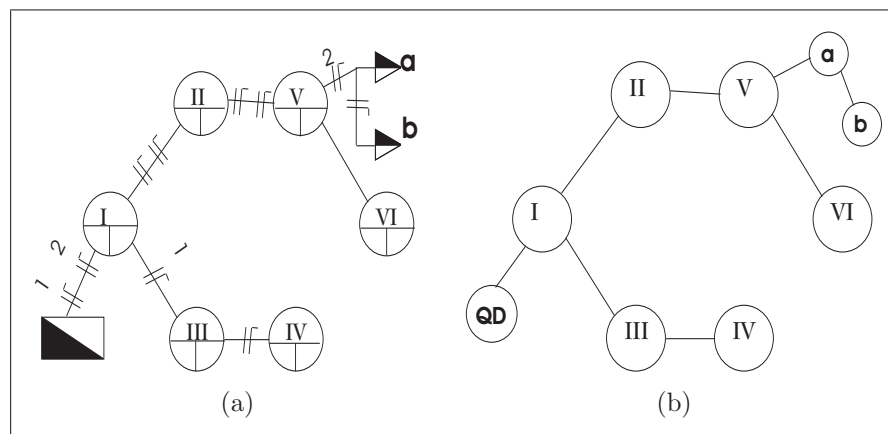


Figura 4.1: Uma instalação elétrica e o seu grafo correspondente.

A instalação é dividida em circuitos elétricos a fim de cumprir critérios fixados em norma [ABNT 2004]. Cada circuito é composto por um conjunto de cargas (vértices do grafo) interligadas por condutores que saem do quadro de distribuição passando internamente por cada eletroduto (arco do grafo). Neste caso, a instalação possui dois circuitos, sendo um formado pelas cargas de iluminação e outro formado pelas cargas de força. Os circuitos formados são armazenados em uma lista para constante atualização, seja no dimensionamento automático dos seus condutores através de inserção/remoção de cargas, seja na visualização no plano do desenho. A Figura 4.2 mostra o circuito formado pelas cargas *a* e *b* do grafo anterior evidenciando os eletrodutos que contém os condutores de energia (fase e neutro) que saem do quadro de distribuição QD interligando as cargas.

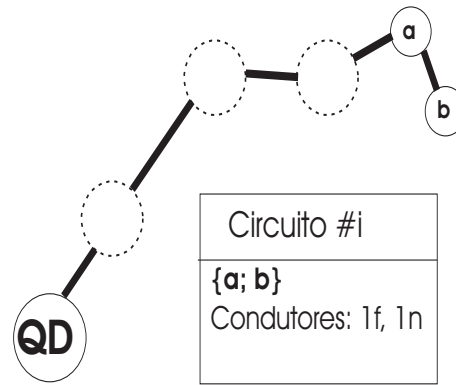


Figura 4.2: Detalhe de um circuito de instalação elétrica.

O número de condutores pode ser dois se o circuito for monofásico ou bifásico e três/quatro se for trifásico [CEMIG 1998]. A Figura 4.3 apresenta o modelo elétrico do circuito da figura anterior. Assim, este circuito da instalação elétrica pode ser analisado de acordo com a teoria de circuitos elétricos [Alexander e Sadiku 2003].

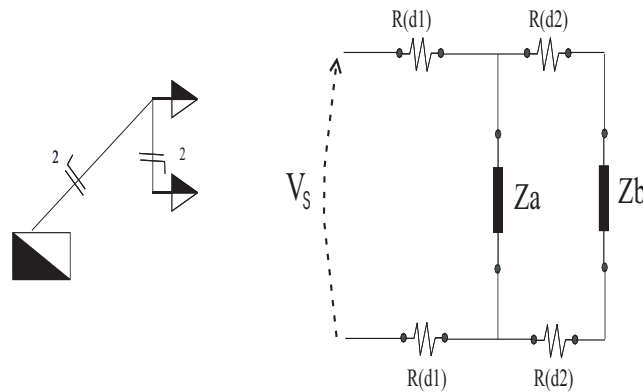


Figura 4.3: Circuito da instalação elétrica modelado com componentes de circuitos elétricos.

O circuito elétrico é formado por uma fonte de tensão V_s localizada no QD e por duas cargas Z_a e Z_b com ângulos de fator de potência ϕ_1 e ϕ_2 e potência aparente N_1 e N_2 , respectivamente. Estas cargas estão a uma certa distância d do QD. A seguir, será apresentado os resultados do cálculo da seção dos condutores do circuito em questão segundo os critérios *queda de tensão e capacidade de corrente* usando o grafo de restrições na representação do circuito. Maiores detalhes deste cálculo pode ser conseguido no Apêndice A.

Queda de Tensão

A queda de tensão ∇V_1 em Z_a é dada por:

$$\nabla V_1 = \frac{2\rho}{VS} N_1 d_1 \cos \phi_1$$

Similarmente,

$$\nabla V_2 = \frac{2\rho}{VS} N_2 (d_1 + d_2) \cos \phi_2$$

A queda de tensão total é a soma das quedas individuais e, possui um valor máximo constante para efeito de dimensionamento dos condutores. Portanto, a seção S dos condutores do circuito analisado é determinada segundo a equação 4.1:

$$S = \frac{2\rho}{V\nabla V} \sum_{i=1}^2 (Nd \cos \phi)_i \quad (4.1)$$

A Figura 4.4 mostra o grafo representando apenas este circuito.

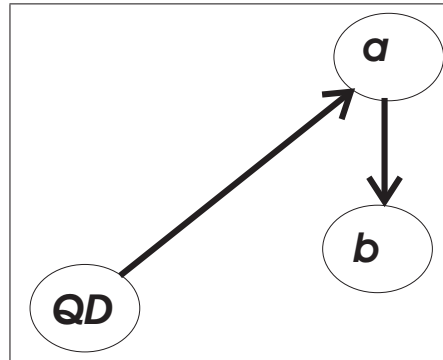


Figura 4.4: Grafo do circuito 2.

Observe que o cálculo de S é determinado facilmente percorrendo o grafo de restrições e computando a distância de cada carga em relação ao QD. O dimensionamento da seção dos condutores, para um circuito elétrico contendo duas cargas, pode ser estendido para n circuitos com m cargas.

Capacidade de Corrente

Por este critério, calcula-se, inicialmente, a corrente de cada circuito e, em seguida, faz-se a sua correção através de fatores para suportar efeitos de temperatura e de

agrupamento de cabos. Novamente, o cálculo desta corrente é suportado pelo grafo de restrições.

A demonstração do dimensionamento dos condutores evidencia a representação da instalação elétrica pelo grafo de restrições. A próxima seção, apresenta a construção do projeto de instalação elétrica com a atualização constante no grafo.

4.3 Satisfação de Restrições

Durante a construção de um projeto de instalações elétricas, o grafo mantém atualizado a geometria do desenho satisfazendo as restrições à medida que o usuário insere pontos elétricos no desenho.

4.3.1 Lançamento de pontos de energia

Considere que, em um determinado momento do projeto, o usuário já tenha lançado as caixas octogonais que são localizadas no teto da residência. Cada uma delas representa, ao mesmo tempo, uma carga de iluminação (calculada em função da área delimitada pelo usuário) e um ponto de derivação da tubulação a fim de se atingir outras cargas por outros caminhos. O sistema forma, automaticamente no desenho, uma malha de triângulos de eletrodutos interligando estas cargas de iluminação, como mostra a Figura 4.5(a). O grafo (Figura 4.5(b)), neste momento, mantém apenas a representação das cargas devido a dinâmica da formação da malha.

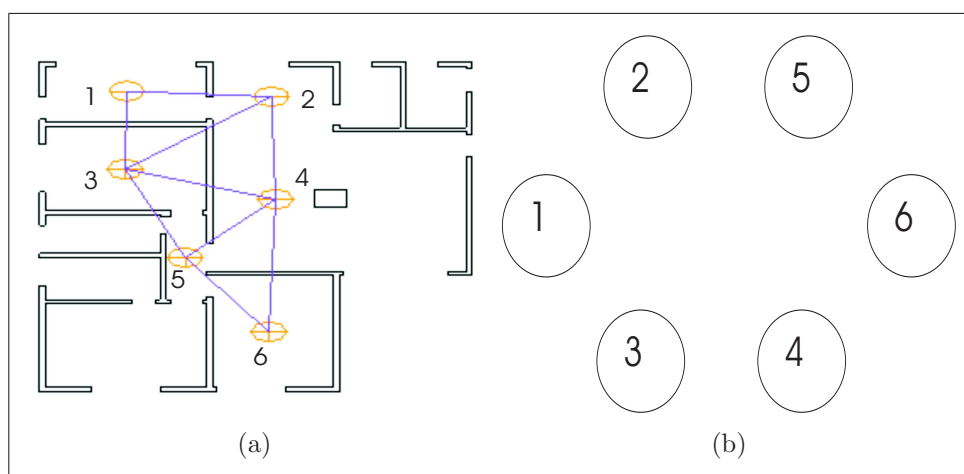


Figura 4.5: Desenho contendo cargas de iluminação interligadas por uma malha de eletrodutos e o grafo correspondente.

A representação da malha no grafo ocorre no momento em que o usuário lança as saídas do QD. Assim, os lados dos triângulos, que formam a malha de eletrodutos, são adicionados como arcos (restrições) não orientados no grafo. O algoritmo de triangulação acelera o processo de construção da malha e é fundamental na distribuição dos eletrodutos e condutores.

A triangulação de Delaunay (DT - Delaunay Triangulation) [Guibas e Russel 2004, Knuth 1993] para um conjunto S de pontos no plano é definida como o conjunto de todos os triângulos (p, q, r) tais que p, q, r estejam em S , e o círculo em cuja borda localizam-se esses pontos esteja vazio - não existem pontos de S em seu interior (ver Figura 4.6).

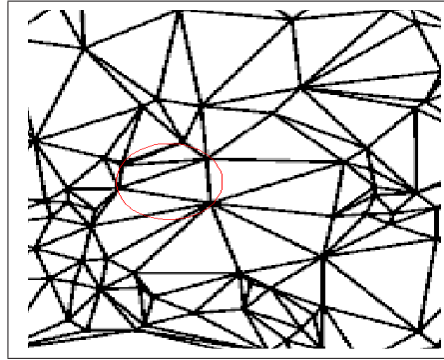


Figura 4.6: Triangulação de Delaunay.

O algoritmo ATDMT, baseado no algoritmo *Triangulação de Delaunay*, é usado para formar a malha de triângulos no desenho.

Algorithm ATDMT

(* Adaptação da Triangulação de Delaunay para a Malha de Teto. *)

Input: Pontos de energia no teto

Output: Seqüência de eletrodutos na malha de teto.

1. $tPoints \leftarrow Vertices.Count$
2. **if** $tPoints < 3$
3. **then** return
4. $HowMany \leftarrow triD.Triangulate(tPoints, Vertices)$ (* Retorna o número de triângulos criados. *)
5. $triLoads.Clear()$
6. **for** $i \leftarrow 1$ **to** $HowMany$
7. **do** $Triangle \leftarrow triD.iVertice(i)$ (* Retorna os índices correspondentes aos vé-

- tices do i-ésimo triângulo *)
8. Load N0 \leftarrow vLoad[Triangle[0]]
 9. Load N1 \leftarrow vLoad[Triangle[1]]
 10. Load N2 \leftarrow vLoad[Triangle[2]]
 11. triLoads.Add(N0) (* Adiciona na lista de saída *)
 12. triLoads.Add(N1)
 13. triLoads.Add(N2)
 14. conduit.drawConduit(N0, N1) (* desenha eletrodutos *)
 15. conduit.drawConduit(N1, N2)
 16. conduit.drawConduit(N2, N0)

Por outro lado, quando o engenheiro lança outras cargas fora da malha de teto, como as tomadas de força para aparelhos eletrodomésticos, o grafo já se orienta de um ponto da malha, ou de uma carga existente, para a nova carga (vide Figura 4.7). Desta forma, o sistema como um todo torna-se incremental (a geometria do desenho com traçado um de eletroduto e o grafo com a inserção de um arco).

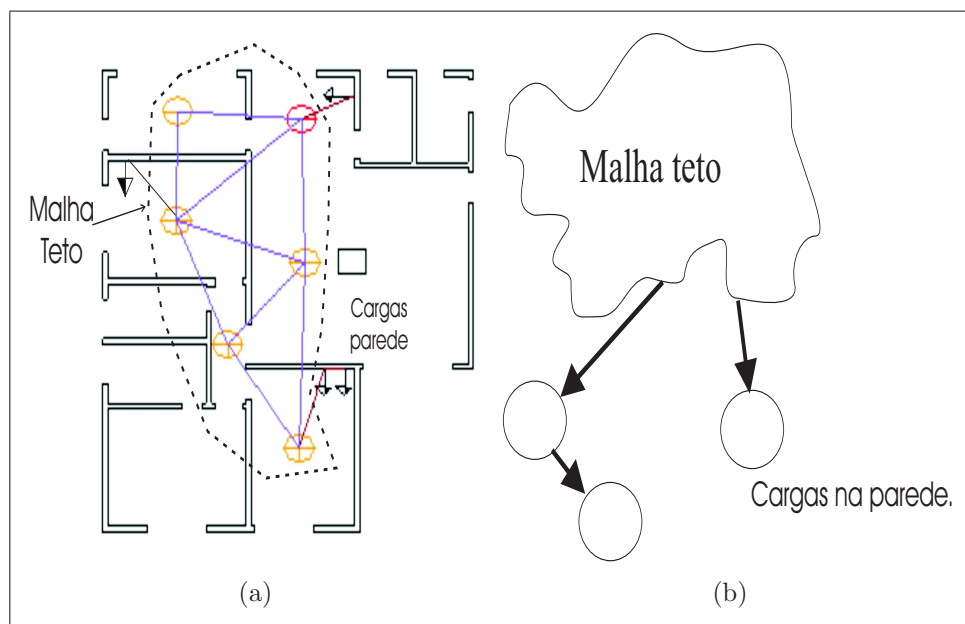


Figura 4.7: Grafo Orientado a Partir da Malha.

Cada carga de força (tomada para aparelho eletrodoméstico) inserida no projeto é, incrementalmente, acomodada no grafo e a direção dos seus arcos permitirá o cálculo da distância entre uma carga qualquer e o QD da instalação.

O sistema permite inserir cargas especiais que geralmente pertencem a circuitos especiais que não podem compartilhar um mesmo eletroduto com outros circuitos. Estas

cargas são acomodadas como vértices no grafo e independente de sua localização não são utilizadas na formação da malha de teto e não são incrementalmente ligadas a outras cargas existentes. O sistema aguarda a conclusão da instalação e alerta ao usuário para fazer o traçado manual dos eletrodutos para os circuitos das cargas especiais.

O quadro de distribuição (QD) é inserido exatamente no centro de carga da instalação [Bosela 2003] e, geralmente, é fixado em alguma parede mais próxima de acordo com o bom senso do engenheiro projetista. Ele é o ponto de distribuição de energia para a instalação elétrica da residência, sendo portanto o ponto de partida dos condutores que formam os diversos circuitos da instalação. No momento em que o usuário insere as saídas do quadro, ocorre também a detecção de possíveis obstáculos para a malha de triângulos. Geralmente, os obstáculos (restrições arquitetônicas) são colunas que são identificadas pelo usuário no projeto.

Quando o sistema detecta que a trajetória de um eletroduto intercepta um obstáculo, a trajetória é re-desenhada de maneira a desviar-se do obstáculo. O sistema utiliza-se das propriedades de cobertura convexa (*convex hull*) [Goodrich e Tamassia 2004] para traçar a menor trajetória possível de eletrodutos que desvie do obstáculo (Figura 4.8). A estratégia [Goodrich e Tamassia 2004] para que isto ocorra é:

- determina se o segmento de reta $s = P_1P_2$ intersecciona o obstáculo Ob . Se não intersecciona, então s é a menor trajetória que evita Ob ;
- em qualquer outro caso, se $s = P_1P_2$ interseccionar Ob , então, o sistema calcula a cobertura convexa H dos vértices do polígono Ob mais os pontos P_1 e P_2 . Os pontos P_1 e P_2 subdividem a cobertura convexa H em duas seqüências poligonais, uma avançando no sentido horário e outra no sentido anti-horário de P_1 até P_2 ;
- o método para esta aplicação retorna a menor das duas seqüências com pontos extremos P_1 e P_2 que se localiza sobre a cobertura H .

A menor seqüência é o menor caminho que desvia-se do obstáculo Ob .

No momento em que o usuário define as saídas do quadro, o sistema percorre o subgrafo (malha de teto) verificando o número de ramificações de cada vértice (caixa octagonal) que deverá ser menor ou igual a oito. Assim, o sistema alerta para que seja eliminada eletrodutos excedentes da malha de teto a fim de manter esta restrição. As saídas do QD definem os menores caminhos na malha de teto entre uma carga qualquer da instalação e àquela apontada pela saída do quadro. Estes menores caminhos

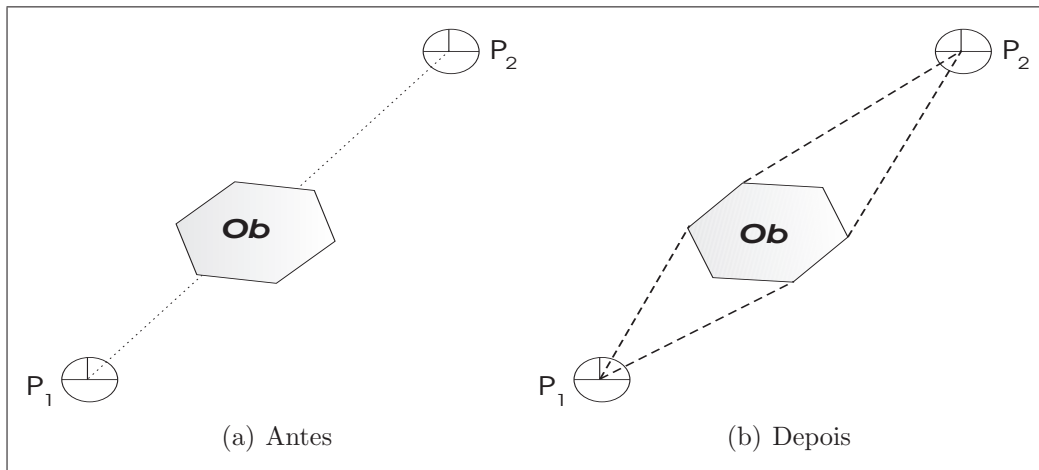


Figura 4.8: Um obstáculo no caminho de um eletroduto.

são chamados de rotas e orientam os arcos que formam a malha contribuindo para o dimensionamento dos próprios eletrodutos e condutores. O algoritmo de *Dijkstra* [Hétroy e Attali 2003] é usado para explorar os vértices do grafo de acordo com a distância de um vértice inicial a um outro vértice qualquer desejado [Kurose e Ross 2003], como apresenta a Figura 4.9.

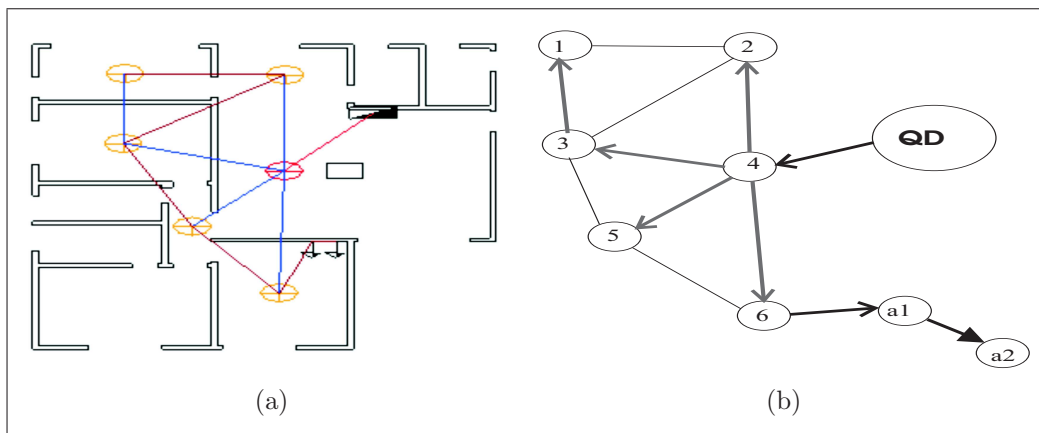


Figura 4.9: Roteamento da malha de teto usando o algoritmo de *Dijkstra*.

O algoritmo de *Dijkstra* calcula os caminhos de menor custo entre um vértice fonte A e todos os outros vértices do grafo (neste caso, o subgrafo é a malha de teto). Ele é iterativo e após a k -ésima iteração determina os caminhos de menor custo para k -vértices de destino. Considere a seguinte notação:

$c(i,j)$ é o custo (distância) do vértice i ao vértice j . Se eles não estiverem conectados o custo $c(i,j) = ind$ (indeterminado);

$D(v)$ é o custo de menor caminho entre o vértice fonte e o vértice destino v ;

$p(v)$ é o vértice anterior ao vértice v ao longo do caminho de menor custo desde o vértice fonte até v ;

N é o conjunto de vértices cujo caminho de menor custo a partir da fonte é conhecido.

Para entender melhor o algoritmo, considere o grafo não direcionado de arestas com pesos não negativos ilustrado na Figura 4.10 onde se deseja obter o menor caminho de um vértice qualquer até o vértice A do grafo.

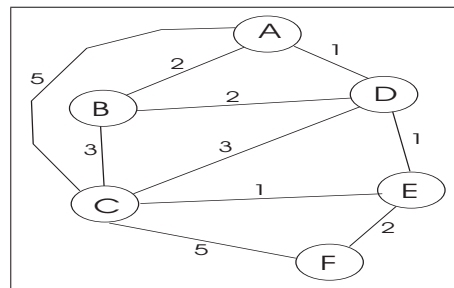


Figura 4.10: Exemplo da aplicação do algoritmo de Dijkstra.

Uma lista de saída é inicializada com o vértice fonte e o algoritmo percorre o grafo calculando o caminho (soma de arestas) de menor custo de um vértice v qualquer até o vértice fonte A. Se não houver caminho entre v e A o custo é considerado infinito. O processo é repetido até que a lista de saída contenha todos os vértices do grafo analisado. A seguir, é mostrado as etapas de execução do algoritmo para o exemplo considerado.

Passo	N	D(B),p(B)	D(C),p(C)	D(D),p(D)	D(E),p(E)	D(F),p(F)
0	A	2,A	5,A	1,A	<i>ind</i>	<i>ind</i>
1	AD	2,A	4,D		2,D	<i>ind</i>
2	ADE	2,A	3,E			4,E
3	ADEB		3,E			4,E
4	ADEBC					4,E
5	ADEBCF					

Após a aplicação do algoritmo de Dijkstra no grafo da Figura 4.10 obtém-se a rota indicada na Figura 4.11.

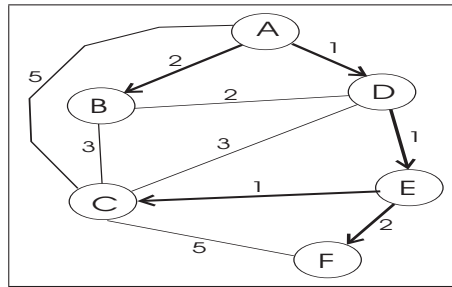


Figura 4.11: Uma rota no grafo da Figura 4.10.

O *algoritmo* RMT, baseado no algoritmo de *Dijkstra*, é usado para formar rotas na malha de teto.

Algorithm RMT

(* Roteamento da Malha de Teto *)

Input: Todos os vértices da malha de teto e um vértice fonte A

Output: Lista contendo uma sequência de vértices dois a dois, indicando um vértice e o seu antecessor na rota

1. $N \leftarrow \{A\}$
2. **for** v in $Mesh$
3. **do if** $v.adjacent(A)$
4. **then** $D(v) = C(A, v)$
5. **else** $D(v) = ind$
6. **repeat**
7. Encontre w não contido em N tal que $D(w)$ seja mínimo
8. $N.Add(w)$
9. Update $D(v)$ para todo v adjacente a w e não contido em N :
10. $D(v) = \min(D(v), D(w) + c(w, v))$
11. (* O novo custo para v é o velho custo ou
12. o custo de menor caminho de w mais o custo
13. entre w e v *)
14. **until** N contenham todos os vértices da malha

Os menores caminhos feitos pelos eletrodutos e condutores interligando cargas de um dado circuito contribuem em termos de eficiência energética: há menos perda de energia e economia de material diminuindo o custo da instalação e garantido economia com o custo energético quando a instalação estiver funcionando [Silva et al. 2005].

Lançamento de interruptores

Os interruptores são lançados no grafo como cargas elétricas de potência nula e contribuem no dimensionamento de eletrodutos e circuitos através do comprimento dos condutores fase e retorno utilizados no seu funcionamento. A Figura 4.12(a) mostra o interruptor S_1 controlando a lâmpada j como um elemento no grafo de restrições (ver Figura 4.12(b)).

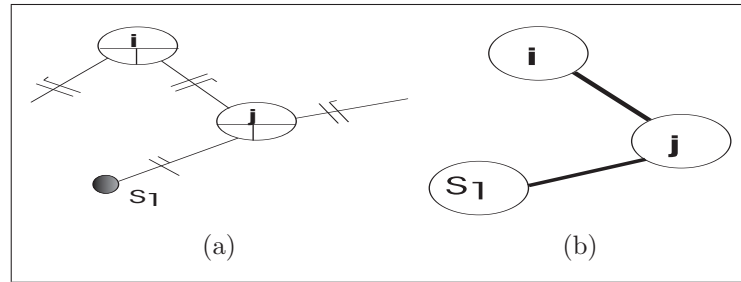


Figura 4.12: O interruptor S_1 é considerado como uma carga no grafo.

4.3.2 Formação de Circuitos

Considere um exemplo, onde o projeto está em sua fase final e o usuário acaba de lançar o quadro de distribuição QD. No grafo, tem-se os vértices correspondentes à malha (1-4) e dois vértices (a e b) correspondendo as cargas fora da malha de teto, além dos arcos (restrições), correspondentes aos eletrodutos. A Figura 4.13 mostra o grafo nesta situação.

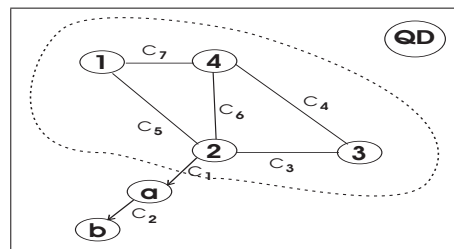


Figura 4.13: Grafo da instalação elétrica.

Quando o usuário estabelece uma saída a partir do quadro, imediatamente é criado uma rota na malha de teto. Esta rota estabelece uma sequência de vértices dois a dois indicando um dado vértice e o seu antecessor naquela rota. A Figura 4.14 destaca a rota (tracejada) estabelecida no grafo, sendo $\{1 \leftarrow 2, 2 \leftarrow 3, 4 \leftarrow 3\}$ a sequência de vértices desta rota.

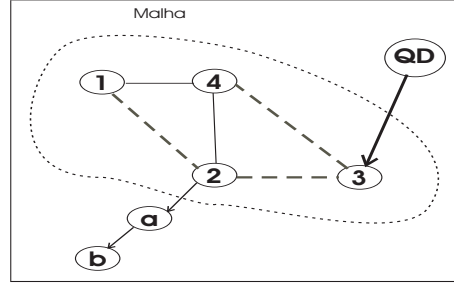


Figura 4.14: Rota destacada no Grafo.

Considere, agora, que se deseja formar um novo circuito, utilizando esta rota, contendo as cargas **a** e **b**. As rotas estabelecidas ficam armazenadas em uma lista e podem ser utilizadas em qualquer circuito formado.

O cálculo de dimensionamento dos condutores dos circuitos da instalação, considerados nesta tese, utiliza os critérios queda de tensão, capacidade de corrente e tabela mínima. O dimensionamento pela queda de tensão neste exemplo ocorre quando se adiciona a carga **a** ao *circuito-x* o produto potência, distância e fator de potência desta carga, equação 4.2, é dado por:

$$powDist = pot_a \cdot Dist_{[a,QD]} \cdot FP_a \quad (4.2)$$

A distância da carga **a** ao quadro é imediatamente calculada atravessando o grafo no sentido reverso a partir da própria carga até chegar em um vértice da malha (carga **2**), o qual possui, na rota armazenada, a distância calculada até o quadro. Assim, a distância da carga **a** é C_3 mais o custo de menor caminho da carga **2** até o quadro. Portanto, no *circuito-x* a variável $powDist$ é atualizada após a inserção da carga **a**. O processo é repetido, assim que a carga **b** for adicionada ao circuito, $powDist$ passa a ter o valor da equação 4.3:

$$powDist = pot_a \cdot Dist_{[a,QD]} \cdot FP_a + pot_b \cdot Dist_{[b,QD]} \cdot FP_b \quad (4.3)$$

É importante notar que a qualquer momento, durante a existência deste circuito, os seus condutores são dimensionados conforme a equação 4.1, apresentada anteriormente. O valor de S para este caso em particular, equação 4.4, é dado por:

$$S = \frac{2\rho}{V\nabla V} powDist \quad (4.4)$$

O *algoritmo* DAC percorre o grafo a partir da carga inserida para calcular a distância desta em relação ao quadro e manter atualizada a seção dos condutores para aquele circuito.

Algorithm DAC

(* Dimensionamento Automático de Condutores *)

Input: Carga adicionada no circuito e rota usada pelo circuito

Output: Atualiza o atributo *powDist* do circuito

1. $pot \leftarrow myLoad.potencia * myLoad.FP$
2. $Dist \leftarrow SaidaQD(myLoad)$
3. (* atravessa o grafo reversamente até encontrar uma carga pertencente a rota *)
4. **while** ($myLoad.ID \neq idRouteCirc$)
5. **do** $theA \leftarrow myLoad.theAncestor$
6. $Conduit\ cond \leftarrow (Conduit)\ Adjacente(theA, myLoad)$
7. $Dist \leftarrow Dist + cond.distance()$
8. $myLoad \leftarrow theA$
9. (* end while *)
10. $powDist \leftarrow powDist + pot * Dist$

O dimensionamento de cada trecho de eletroduto é feito à medida em que se dimensiona os condutores de cada circuito que passa por aquele trecho. O sistema alerta o usuário, para que utilize outra rota para o circuito a ser dimensionado, quando os seus condutores contribuírem de tal forma que o diâmetro daquele trecho de eletroduto assuma valores próximos a 25 mm (vinte e cinco milímetros). Assim, o projetista corrige a distribuição de circuitos ao longo da malha de teto e uniformiza o diâmetro dos eletrodutos.

4.4 Complexidade algorítmica do sistema

A complexidade algorítmica considerada nesta tese será o *big-Oh*¹⁴ $O()$ das operações para a construção do grafo de restrições e durante a utilização do grafo definitivo no estabelecimento de rotas, a serem utilizadas nas formações dos circuitos elétricos. Como mostra a Figura 4.5 da Seção 4.3, a inserção de vértices correspondentes às cargas

¹⁴é uma notação matemática usada para representar o comportamento assintótico de funções.

de iluminação é direto com um custo constante de inserção de cada carga. Entretanto, durante a inserção de vértices correspondentes às cargas para aparelhos eletroeletrônicos há um custo adicional correspondente a inserção da aresta orientada ligando o novo vértice com um já existente no grafo. Portanto, nesta fase de inserção de vértices o big-Oh é linear dependendo apenas do número de vértices e arestas do grafo.

Quando o usuário cria saídas do quadro de distribuição é finalizada a malha do desenho e aplicado o algoritmo de Delaunay considerando as m cargas do teto de um total de n cargas. Assim, neste momento a complexidade algorítmica passa a ser do algoritmo ATDMT¹⁵ que é $O(m^2)$ aplicado apenas no subgrafo correspondente à malha do teto.

Finalmente, durante a formação das rotas pode-se ter no pior caso m rotas, ou seja, cada vértice do *subgrafo teto* seria um vértice fonte para o cálculo do menor caminho, algo que dificilmente ocorrerá pois para o propósito de instalações residenciais pode-se utilizar QD's padronizados com no máximo quatro saídas. De qualquer modo, a complexidade, neste caso, seria m vezes a complexidade do algoritmo de Dijkstra RMT que é no pior caso de $O(m^2)$. Assim, tem-se a complexidade total no estabelecimento de rotas de $O(m^3)$. Lembrando que m , o número de vértices correspondente à malha de teto, é menor que n , número total de vértices do grafo. Além disso, a utilização de algoritmos mais eficientes diminuirá a complexidade do sistema. Isto é sugerido como trabalho futuro com a possibilidade de utilizar programação dinâmica para a escolha da melhor rota. Com isto poderia ter algoritmos que maximize a capacidade de eletroduto e minimize a distância percorrida pelas rotas.

4.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou como o grafo de restrições pode ser estendido para representar uma instalação elétrica e, como ele é atualizado incrementalmente a cada nova carga adicionada. As restrições, eletrodutos com condutores de energia para esta nova carga, são automaticamente inseridas no grafo. Exceção se faz para as cargas que formam a malha de teto. Todavia, a imposição tardia das restrições devido a malha tem fundamento à medida em que a malha, no desenho, vai se adaptando à construção do

¹⁵O algoritmo para a triangulação de Delaunay utilizado como base do algoritmo ATDMT é um algoritmo quadrático [Carvalho e Figueiredo 1991]

projetista.

A direção do arco no grafo é no sentido do fluxo de energia que vai do quadro de distribuição para uma dada carga, procurando sempre o menor caminho. A contribuição desta técnica de projeto é a economia de material e uma *customização*¹⁶ eficiente para projetos de instalação elétrica.

O próximo capítulo apresenta a implementação do sistema baseando-se nos casos de usos levantados e nos algoritmos aqui apresentados.

¹⁶A palavra *customização* originou-se do termo em inglês *customization* que significa personalização. *Customização* é a capacidade de certos programas serem adaptados às necessidades de um usuário específico ou para realizar uma determinada tarefa.

Capítulo 5

Arquitetura do Sistema Proposto - Análise e Implementação

5.1 Introdução

A arquitetura do sistema proposto é apresentada neste capítulo, a partir da sua análise e implementação. O ciclo de vida do sistema abrange desde a sua concepção através da especificação de requisitos, diagramas de casos de uso e diagrama de classes, até a sua arquitetura destacando a implementação dos componentes *GUI* (Interface Gráfica com o Usuário) e GR (Grafo de Restrições).

A demonstração dos algoritmos propostos no Capítulo 4 é descrito através da implementação de um sistema baseado em restrições. Todas as implementações foram desenvolvidas usando a linguagem C# da Microsoft para a plataforma .NET. Ver referências:

[Corporation 2001], [Turtschi, Werry e Hack 2004], [Deitel et al. 2003]

[Camara 2003], [Wille 2001], [Galuppo, Matheus e Santos 2004]

[Hickson 2005], [Archer 2001], [Lima e Reis 2002]

[Allen et al. 2004], [Watson et al. 2002], [Liberty 2006]

5.2 Especificação de requisitos

Uma visão geral do sistema é que ele auxilie o engenheiro projetista, a criar um projeto de instalações elétricas posicionando todos os pontos de energia necessários em uma planta arquitetônica e traçando a tubulação de eletrodutos que irá conter os condutores de energia da residência. Com base nas informações de desenho e da interação com o engenheiro, o sistema faz a divisão de circuitos para o dimensionamento dos eletrodutos, condutores e disjuntores. Além disso, o sistema gera um relatório (memorial descritivo) contendo tabelas dos circuitos formados e listas do material a ser utilizado na instalação.

Esta etapa visa alcançar uma lista dos requisitos que o sistema deve contemplar [IEEE-STD-830 1998]. Cada requisito é uma declaração clara e concisa de uma funcionalidade ou característica única que um sistema deve implementar. Um sistema *CAD/CAE* requer uma lista enorme de requisitos o que fugiria um pouco do escopo desta tese. Assim, apenas os requisitos observados como importantes e não contemplados, na maioria dos *CAD/CAE's* analisados, são apresentados abaixo:

1. Requisitos de usuário: O sistema deve ler a planta arquitetônica em 2D da residência e exibi-la em 2D/3D para que possa iniciar o projeto de instalações elétricas

Requisitos de sistema:

- 1.1 Deve ser possível armazenar os dados referentes às paredes em uma estrutura de dados;
- 1.2 O arquivo com os dados da planta arquitetônica deve estar no formato *dxf*;
- 1.3 O sistema deve percorrer a lista (estrutura de dados) desenhando os modelos 2D/3D das paredes;

2. Requisitos de usuário: O sistema deve Cadastrar os pontos de energia da instalação elétrica

Requisitos de sistema:

- 2.1 Os pontos de energia serão armazenados como vértices em um grafo;
- 2.2 O cálculo da potência das lâmpadas será em função da área e do tipo do cômodo da residência ;

- 2.3 A potência dos aparelhos *eletro-eletrônicos* é consultado em um arquivo;
- 2.4 Os eletrodutos que interligam os pontos de energia serão lançados como arcos no grafo;
- 2.5 Os pontos de energia localizados no teto formarão uma malha de eletrodutos interligando-os através de uma triangulação;
- 2.6 Cada ponto de energia não localizado no teto terá os eletrodutos incrementalmente lançados no grafo.

3. Requisitos de usuário: O sistema deve exigir uma seqüência padrão para a confecção do projeto

Requisitos de sistema:

- 3.1 O primeiro ponto de energia a ser lançado deve ser uma lâmpada;
- 3.2 A tubulação será traçada automaticamente ou incrementalmente;
- 3.3 O quadro de distribuição deverá ser lançado após o lançamento de todos pontos de energia e em seguida, através da interação do engenheiro como o sistema, calcula-se o tipo de fornecimento de energia por parte da concessionária;
- 3.4 A formação dos circuitos elétricos ocorrerá após o lançamento do quadro e a definição de rotas na malha de eletrodutos no teto;
- 3.5 O sistema deve gerar o relatório da instalação contendo critérios e tabelas utilizadas;

4. Requisitos de usuário: O sistema deve permitir a visualização 3D da instalação elétrica

Requisitos de sistema:

- 4.1 Possibilidade de proporcionar navegação, imersão e interação;
- 4.2 Manipulação dos objetos 3D.

5. Requisitos de usuário: O sistema deve possibilitar o cálculo automático de menores comprimentos de condutores e eletrodutos visando à eficiência energética

Requisitos de sistema:

- 5.1 O usuário deverá indicar um ponto de energia correspondente a cada saída do quadro de distribuição ;
- 5.2 O sistema determina rotas na malha de eletrodutos a partir das saídas do quadro;

5.3 Modelos de caso de uso

O levantamento de necessidades do sistema destina-se a capturar os requisitos de funcionamento do mesmo, apoiando-se nos Modelos de Caso de Uso sugeridos pela UML (Unified Modeling Language) [Booch, Rumbaugh e Jacobson 2005] e numa descrição textual destes.

O ator envolvido no sistema é apenas o engenheiro projetista que é o usuário do sistema. Ele inicia e finaliza tarefas através da interação com o sistema, em alguns casos a interação do usuário dispara tarefas que o sistema realiza automaticamente.

A Figura 5.1 mostra os principais casos de uso previstos para o sistema.

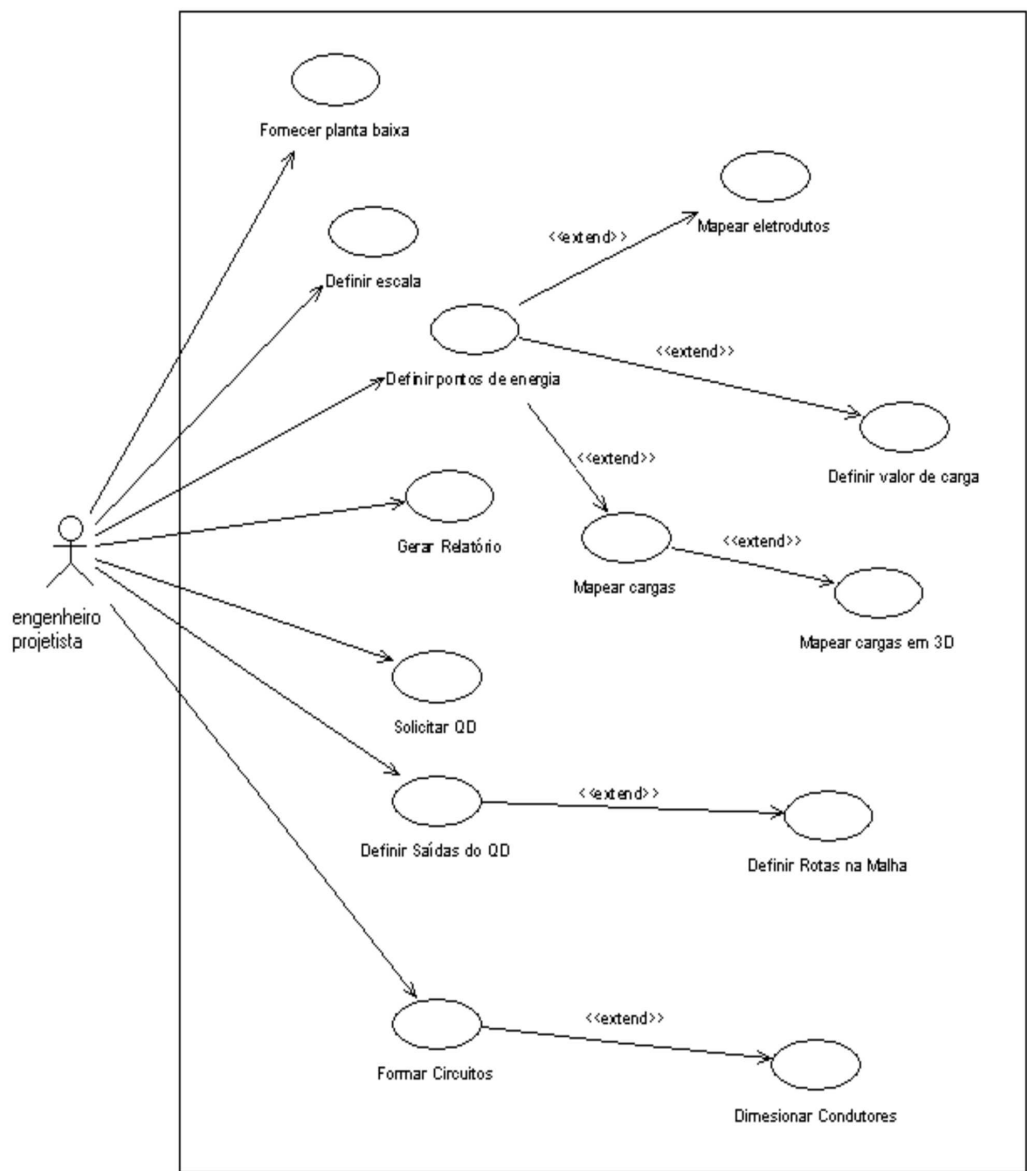


Figura 5.1: Casos de uso do sistema.

Descrição do Caso de Uso: <i>Fornecer planta baixa</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O engenheiro especifica o caminho do arquivo dxf que contém a planta baixa	2	O Sistema percorre o arquivo e desenha os objetos 2D e 3D, referentes ao projeto arquitetônico.

Descrição do Caso de Uso: <i>Definir Escala</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O engenheiro desenha um segmento na tela e, em seguida, define um valor correspondente para o segmento desenhado	2	O sistema calcula o valor da escala correspondente para o desenho e a armazena em uma variável para cálculos de áreas, perímetros etc
		3	O sistema apaga o desenho do segmento.

Descrição do Caso de Uso: <i>Definir Pontos de Energia</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O engenheiro delimita na tela de desenho, com o mouse, a área do comando a ser iluminado ou, caso o ponto seja uma tomada, indica o local da parede a ser instalada.	2	O sistema insere no grafo cada carga de acordo com o ponto de energia inserido pelo usuário e posiciona o símbolo correspondente da carga no desenho.

Descrição do Caso de Uso: <i>Definir Valor de Carga</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
2	Extensão de <i>Definir pontos de energia</i>	1	O sistema faz abrir uma caixa de diálogo para definir o valor de carga luminotécnica ou de carga de força.
	O engenheiro fornece os parâmetros necessários ao dimensionamento luminotécnico (W/m^2 ou Lúmens) ou escolhe o aparelho para o correto dimensionamento da tomada.	3	O sistema armazena a potência de cada carga no grafo. O valor da lâmpada é calculado e o da tomada específica para o aparelho escolhido.

Descrição do Caso de Uso: <i>Mapear Eletrodutos</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
2	Extensão de <i>Definir pontos de energia</i>	1	Os eletrodutos são traçados (desenhados) à medida que insere a carga de força (interligando-a a uma carga existente) ou durante a formação da malha de triângulos, que interliga as cargas de iluminação, no teto.
	O engenheiro interage com o sistema para escolher uma carga existente mais conveniente quando do lançamento de cargas de força	3	O sistema armazena os dados dos eletrodutos relativos às cargas de forças como arcos no grafo.

Descrição do Caso de Uso: <i>Mapear Cargas</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
	Extensão de <i>Definir pontos de energia</i>	1	As cargas são desenhadas, em 2D, no centro da área delimitada pelo usuário (carga de iluminação) e na parede (carga de força)

Descrição do Caso de Uso: <i>Mapear Cargas em 3D</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
	Extensão de <i>Mapear Cargas</i>	1	As cargas são desenhadas, em 3D, conforme as coordenadas 2D convertidas para o plano xz e a altura y correspondendo ao objeto a ser desenhado.

Descrição do Caso de Uso: <i>Gerar Relatório</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O usuário “clica” no botão para gerar relatório da instalação projetada	2	O sistema salva em um arquivo do Microsoft Word™ as informações relativas a um memorial descritivo da instalação.

Descrição do Caso de Uso: <i>Solicitar QD</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O engenheiro “clica” no botão correspondente para inserir o QD no desenho.	2	O sistema insere o símbolo do QD no centro de carga da instalação e armazena todas as suas informações como um vértice no grafo.

Descrição do Caso de Uso: <i>Definir Saídas do QD</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O usuário “clica” no botão que altera o modo de desenho para “definir saídas” e então “seleciona” cargas a serem ligados pelo QD.	2	O sistema desenha eletrodutos interligando o QD às cargas selecionadas e adiciona-os no grafo como arcos.

Descrição do Caso de Uso: <i>Definir Rotas na Malha</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
	Extensão de <i>Definir Saídas do QD</i>	1	O sistema, neste momento, cria os arcos no grafo correspondentes à malha de eletrodutos no teto.
		2	O sistema calcula os menores caminhos na malha a partir dos vértices selecionados. Em seguida, armazena estes caminhos como rotas do grafo.

Descrição do Caso de Uso: <i>Formar Circuitos</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
1	O usuário “clica” ou digita um comando relativo à formação de circuitos da instalação.	2	O sistema chama uma caixa de diálogo relativa a formação de circuitos.
3	O usuário pode adicionar um novo circuito, editar parâmetros padrões de circuitos, definir a rota de eletrodutos por onde os condutores do circuito percorrerão e adicionar cargas ao circuito formado		

Descrição do Caso de Uso: <i>Dimensionar Condutores</i>			
	Ação do Ator		Resposta do Sistema
	Extensão de <i>Formar circuitos</i>	1	O sistema atualiza a seção dos condutos (condutores e eletrodutos) a cada adição de cargas em um circuito.

5.4 Análise do Sistema

5.4.1 Diagrama de Classes

As principais classes que constituem o sistema estão mostrados no Diagrama de Classes da Figura 5.2.

Relacionamentos

A classe *Graph* é formada pelas classes agregadas *Load*, que é o vértice do grafo, e *Conduit*, que é o arco do grafo. A classe *Load* é uma generalização das classes *Lamp*, *Socket* e *SEB*.

Um Circuito (*classe Circuit*) possui cargas (*classe Load*) e uma rota (*classe Route*). Enquanto que uma rota (*classe Route*) é formada por eletrodutos (Conduits) - sequência

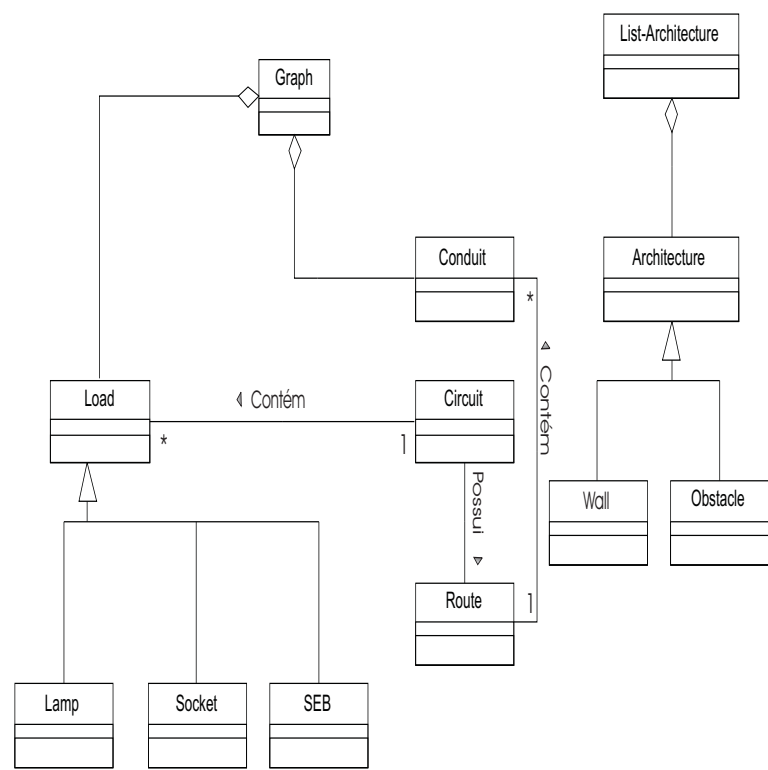


Figura 5.2: Diagrama de classes do sistema.

de vertices dois a dois.

Classe Graph

A classe *Graph* é responsável pelo armazenamento de toda a instalação elétrica. A especificação básica dela é mostrada na Figura 5.3.

Graph
#Nodes #Arcs
+addLoad() +addConduit() +powerSum() +dijkstra() +triangulationDT()

Figura 5.3: Especificação da Classe Graph.

Os atributos Nodes e Arcs são listas encadeadas de objetos do tipo Load e Conduit, respectivamente. Estes objetos são adicionadas às listas através dos métodos *addLoad()* e *addConduit()*. O método *powerSum()* retorna a potência total da instalação elétrica, o método *Dijkstra()* retorna uma rota de menor caminho a partir de uma carga da instalação e o método *triangulationDT()* acrescenta arestas no grafo a partir do algoritmo

da triangulação de Delanay.

Classe Load

A classe Load modela os vértices do grafo correspondentes às cargas elétricas. Através das propriedades listIN e listOut o sistema percorre o grafo para o cálculo das distâncias de uma carga até o QD. O atributo Selected sinaliza se a carga está no modo “selecionada” que dependendo do contexto pode ter a cor alterada ou aguardando a seleção de uma outra carga para desenhar uma *eletroduto* entre elas. A potência da carga é armazenada no campo Power e a propriedade ID a define unicamente como um vértice no grafo. A especificação básica desta classe é mostrada na Figura 5.4.

Load
#List_IN #List_Out #Selected #ID #Power
+draw2D() +draw3D()

Figura 5.4: Especificação da Classe Load.

Os métodos virtuais *Draw2D()* e *Draw3D()* são sobrecarregados pelas classes derivadas conforme o objeto do grafo a ser desenhado.

Classe Conduit

A classe Conduit modela os arcos do grafo correspondentes aos eletrodutos. Através das propriedades NodeStart e NodeEnd têm-se o sentido do eletroduto que orienta o grafo. O atributo ID identifica cada conduit unicamente como um arco no grafo. A especificação básica desta classe é mostrada na Figura 5.5.

Conduit
#NodeStart #NodeEnd #ID
+draw2D() +draw3D() +distance()

Figura 5.5: Especificação da Classe Conduit.

Os métodos *Draw2D()* e *Draw3D()* desenhavam os modelos de conduits tanto em duas quanto em três dimensões. O método *distance()* retorna o comprimento do trecho de *eletroduto* entre duas cargas.

Classe Circuit

A classe *Circuit* é responsável pelo dimensionamento de eletrodutos e condutores a partir de um conjunto de cargas ligadas a uma tensão comum. A especificação básica desta classe é mostrada na Figura 5.6.

Circuit
#ID #Route #Loads
+addLoad() +section()

Figura 5.6: Especificação da Classe Circuit.

O atributo ID identifica unicamente um circuito, o atributo *Route* identifica uma rota (caminho) por onde passarão os condutores para interligar as cargas do circuito, que são armazenadas no campo Loads. O método *addLoad()* adiciona cargas ao circuito, enquanto o método *Section()* retorna a seção transversal dos condutores.

Classe Route

A classe *Route* é responsável pelo armazenamento de um conjunto de eletrodutos definindo menores caminhos no subgrafo correspondente à malha de teto. A especificação básica desta classe é mostrada na Figura 5.7.

Route
#ID #Conduits
+addConduit()

Figura 5.7: Especificação da Classe Route.

O atributo ID identifica unicamente uma rota, o atributo *Conduits* armazena a sequência de cargas, duas a duas (destino \leftarrow origem), de maneira que o sistema consiga estabelecer uma rota a partir de uma dada carga. O método *addConduit()* adiciona tais cargas.

Classe Architecture

A classe Architecture modela os dados de arquitetura da planta baixa através da propriedade *listVertices*. A especificação básica desta classe é mostrada na Figura 5.8.

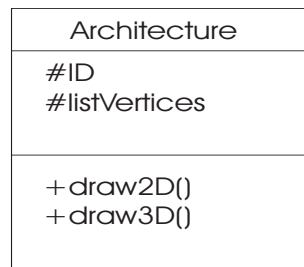


Figura 5.8: Especificação da Classe Architecture.

O atributo ID identifica unicamente uma arquitetura (parede ou obstáculo). Os métodos virtuais *Draw2D()* e *Draw3D()* são executados conforme o objeto, na sequência da lista, a ser desenhado.

5.5 Arquitetura do Sistema

A arquitetura básica do sistema é apresentada na Figura 5.9. Ela é composta pela *GUI* (*Graphical User Interface - Interface Gráfica para o Usuário*) com acesso às bibliotecas *OpenGL* [Angel 2000] e o Gerenciador de Restrições.

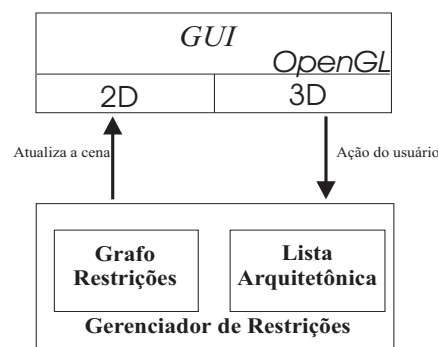


Figura 5.9: Arquitetura do Sistema

Através da *GUI*, o usuário pode visualizar e manipular os objetos 2D e 3D durante a construção do projeto, estas ações são controladas pelo Gerenciador de Restrições que atualiza o Grafo de Restrições e a Lista Arquitetônica. A seguir, cada um destes módulos é explicado detalhadamente.

5.5.1 A Interface Gráfica com o Usuário

A Figura 5.10 mostra a *GUI* do sistema proposto com um projeto 2D/3D gerado a partir da leitura de um arquivo com informações de dados arquitetônicos (paredes e colunas). A *GUI* é composta de controles como a barra de menu, a barra de botões, a tela de desenhos (com viewports 2D e 3D) e o *Volante de Navegação* cujas funções são apresentadas a seguir.

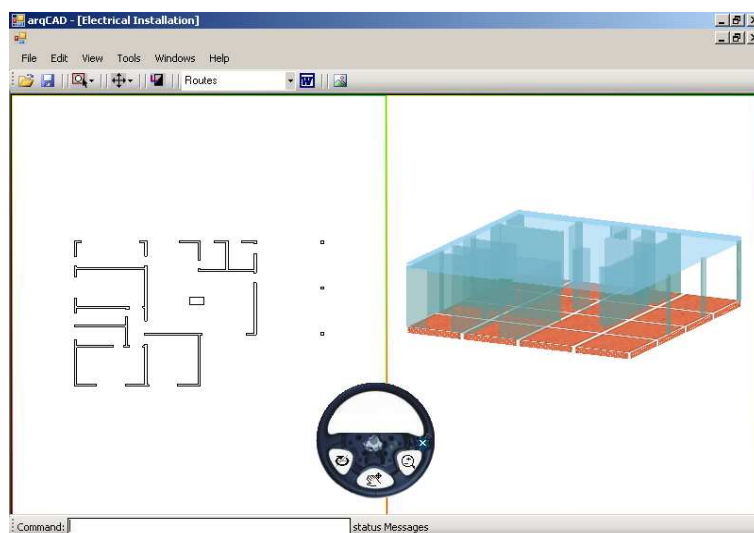


Figura 5.10: Sistema com um projeto arquitetônico.

A *GUI* permite ao usuário criar e manipular objetos elétricos como lâmpadas e tomadas, além de oferecer suporte para operações de navegação. O projeto pode ser visualizado em 2D, em 3D ou em ambos ao mesmo tempo. Isto possibilita um entendimento mais natural do projetista e de outras pessoas envolvidas no projeto (por exemplo o cliente). Tal característica não é comum na maioria dos sistemas *CAD/CAE* para Instalações Elétricas [Moreira 2003].

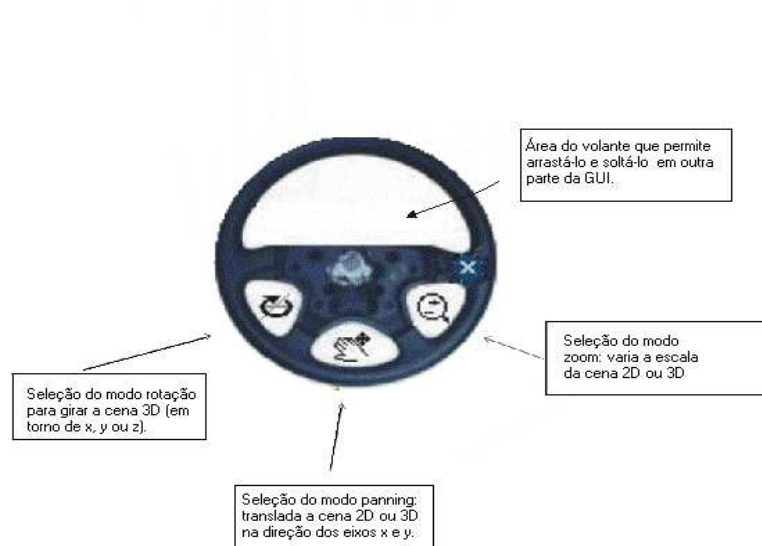


Figura 5.12: Volante de navegação.

O volante permite ao usuário selecionar o modo de navegação no ambiente tridimensional que pode ser evoluído para um ambiente virtual. A definição de Realidade Virtual (RV) como uma interface que simula um ambiente real e permite aos participantes interagirem com o mesmo [Latta e Oberg 1994, Aukstakalnis e Blatner 1992] pode vir a ser aplicado a este sistema, onde o ambiente real seria a instalação elétrica em uma edificação e os participantes seriam, por exemplo, o engenheiro e o cliente que interagiriam com o ambiente ajustando as lâmpadas, visualizando os condutores que interligam aparelhos, inclusive podendo simular o aquecimento destes condutores e o consumo de energia dos diversos aparelhos eletro-eletrônicos [Cardoso, Faria e Lamounier 2002, Cardoso, Bissochi e Lamounier 2003]. Um exemplo de aplicação do volante para uma instalação virtual seria na imersão do usuário ao longo da instalação, onde o usuário controlaria a velocidade e a direção (direita e esquerda) de sua viagem.

Barra de Comando

A Figura 5.13 mostra a caixa de comando juntamente com a barra de status. O sistema responde a certos comandos como importar, salvar, mover etc. Enquanto a barra de status mostra a ação corrente para o usuário.



Figura 5.13: Barra de comando e status.

Barra de Menu

A Figura 5.14 mostra a barra de menu do sistema.

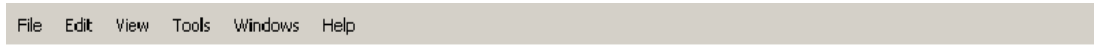


Figura 5.14: Barra de menu.

O significado de cada item é:

File:

- New: Inicia um novo projeto;
- Open: Abre um projeto existente;
- Save: Salva o projeto corrente;

Edit:

Altera valores de cores de objetos como lâmpadas, paredes, cor de fundo etc

View:

Altera entre a visualização dos desenhos 2D, 3D e ambos simultaneamente

Tools:

- Pan: Permite deslocar o desenho verticalmente e horizontalmente;
- Zoom: Permite aproximar ou afastar do desenho;
- Scale: Permite tomar alguma medida em *mm* a fim de ajustar a escala de projeto;
- Select: Permite selecionar um objeto do desenho;
- Save: Permite salvar o desenho no formato bmp.

Windows:

Permite alterar entre os projetos abertos.

Help:

Auxilia o usuário com questões mais comuns e um tutorial para o entendimento do sistema.

5.5.2 O Gerenciador de Restrições

O Gerenciador de restrições controla as ações do usuário, através da *GUI*, relacionadas às restrições de projeto. Ele atualiza o Grafo de Restrições de acordo com essas ações.

O Gerenciador de Restrições, durante a finalização da malha de teto, executa o método para detectar intersecções entre eletrodutos da malha e obstáculos. Uma vez identificado colisões, o Gerenciador de Restrições marca cada eletroduto interceptado.

Assim, na varredura do grafo, os eletrodutos marcados são redesenhados a fim de contornar obstáculos.

5.5.3 Grafo de Restrições

O Grafo de Restrições mantém em seus vértices as informações geométricas e de engenharia das cargas elétricas. Além disso, ele mantém em seus arcos as informações referentes as restrições (eletrodutos) entre duas cargas elétricas. Os vértices e os arcos possuem métodos de visualização automática em 2D e em 3D.

5.5.4 Lista Arquitetônica

A lista arquitetônica possui em cada um dos seus nódulos as informações necessárias para a representação de um objeto arquitetônico, como parede e obstáculo. Informações como os vértices de uma poligonal fechada em 2D e a altura deste objeto em 3D são fundamentais para os desenhos dos objetos.

5.6 Implementação do Sistema Proposto

5.6.1 Telas para desenhos 2D/3D

As telas onde são desenhados o projeto 2D e o projeto 3D são alteradas conforme ação do usuário na *GUI*. A Figura 5.15 apresenta duas *viewports* para mostrar o desenho tanto em duas quanto em três dimensões. O usuário opcionalmente pode trabalhar em apenas uma das duas *viewports*.

Durante a sobrecarga do evento *onPaint()* pelo método corresponde em OpenGL, ocorre a construção dos desenhos nas *viewports* correspondentes. O código 5.6.1 apresenta fragmentos correspondentes a esta situação.

Conforme o tipo de visualização do desenho (2D/3D, somente 2D ou somente 3D) são chamados métodos para desenhos que se diferenciam de acordo com as primitivas e métodos usados da biblioteca OpenGL.

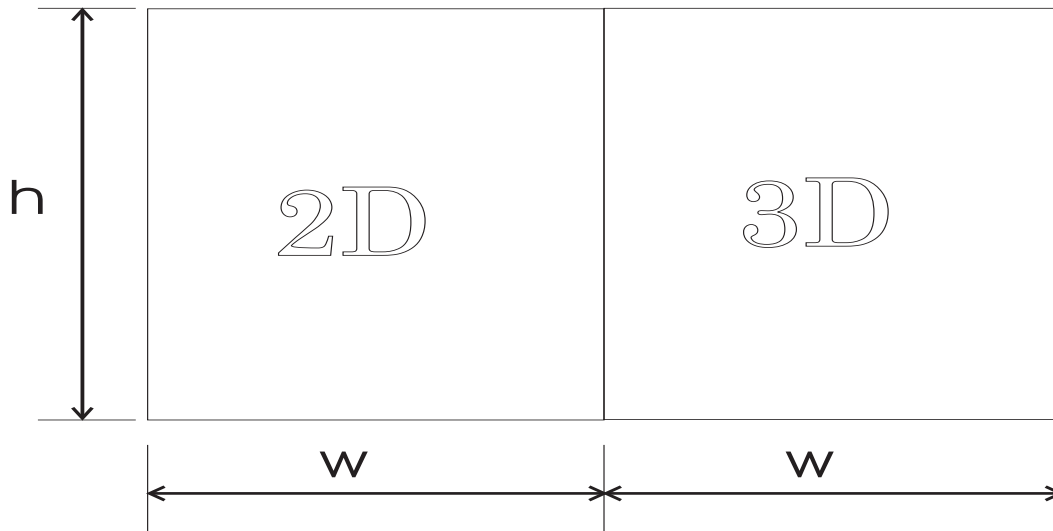


Figura 5.15: Dimensionamento das viewports.

```

1  protected override void OnPaint(PaintEventArgs e )
2  {
3      /* ajusta a cor para branco e
4       limpa a tela */
5      Color c = Color.White;
6      GL.glClearColor((float)c.R / 255,
7                      (float)c.G / 255,
8                      (float)c.B / 255, 1);
9      GL.glClear(GL.GL_COLOR_BUFFER_BIT|GL.GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
10     // verifica quais viewports devem ser mostrados
11     switch (nViewPort)
12     {
13         case 23: // ambos viewports 2D e 3D
14             painting2D(this.Width/2, 0);
15             painting3D(this.Width/2, 0, this.Width/2, 0, w/2);
16             break;
17         case 2: // apenas viewport 2D
18             painting2D(this.Width , w/2);
19             break;
20         case 3: // apenas viewport 3D
21             painting3D(0,0, this.Width, -w/2, w/2);
22             break;
23     }
24     GL.glFlush ();
25     WGL.wglSwapBuffers(DC);
26 }

```

Código 5.6.1: Códigos para desenho em viewports.

5.6.2 Implementação do Grafo de Restrições

A estrutura de dados para o *Grafo de Restrições* é composta de um conjunto para os vértices (*cargas*) e outro para as arestas (*eletrodutos*). Cada vértice possui uma lista

de saída (*list_Out*) para instâncias das arestas que saem dele e uma lista de entrada (*list_In*) para as arestas que o aponta. Alguns métodos da classe correspondente ao *GR* são listados abaixo:

<i>centerLoad()</i>	Retorna um tipo <i>PointF</i> correspondendo ao centro de carga da instalação elétrica
<i>powerSum()</i>	Retorna um tipo <i>double</i> correspondendo a potência total da instalação elétrica
<i>Adjacente(Load N1, Load N2)</i>	Retorna um tipo <i>Conduit</i> correspondendo ao arco existente entre as duas cargas, se não forem adjacentes retorna <i>null</i>
<i>Dijkstra(Load source)</i>	Cria uma rota de menor caminho de todas as cargas da malha de teto em relação a carga <i>source</i> e em seguida, armazena a rota formada em uma lista de rotas.
<i>ObjectNoLamp(string Idf)</i>	Retorna um tipo <i>Lamp</i> correspondendo ao objeto lâmpada identificado por <i>Idf</i>
<i>ObjectArc(string Idf)</i>	Retorna um tipo <i>Conduit</i> correspondendo ao objeto arco identificado por <i>Idf</i>
<i>whoObject(PointF belong)</i>	Retorna um tipo <i>Load</i> correspondendo ao objeto <i>Load</i> identificado por um ponto
<i>addAresta(Load N1, Load N2)</i>	Adiciona um <i>Conduit</i> (arco) entre as cargas (vértices) <i>N1</i> e <i>N2</i> .

Os métodos principais dos componetes do grafo (vértices e arcos) são os chamados métodos de desenho. Os métodos *draw2D()* e *draw3D()* da classe *Load* são implementados como métodos virtuais e são sobrecarregados nas classes derivadas *Lamp*, *Socket* e *SEB*. A classe *Conduit* também possui os métodos de desenho *draw2D()* e *draw3D()*. Estes métodos são executados quando o sistema percorre o grafo de restrições a cada evento *onPaint()* particularmente durante a execução dos métodos (*painting2D()* e *painting3D()*) mostrados no código 5.6.1. O código 5.6.2 refere-se ao método *draw3D()* responsável pela modelagem dos objetos 3D presentes no grafo.

```
1 private void draw3D()
2 {
3     // Pega um enumerador para o conjunto de vértices do grafo
4     IDictionaryEnumerator enumerator = grafoGL.Nodes.GetEnumerator();
5     while ( enumerator.MoveNext() )
6     {
7         // para cada vértice chame o método de desenho
8         Load L = (Load) enumerator.Value ;
9         L.draw3D();
10    }
11
12    // Pega um enumerador para o conjunto de arcos do grafo
13    enumerator = grafoGL.Arcs.GetEnumerator();
14    while ( enumerator.MoveNext() )
15    {
16        // para cada arco chame o método de desenho
17        Conduit C = (Conduit) enumerator.Value ;
18        C.draw3D();
19    }
20
21 }
```

Código 5.6.2: *Varredura do grafo.*

Lâmpada

A Figura 5.16 mostra a representação em 2D e em 3D de uma lâmpada (vértice do grafo).



Figura 5.16: Modelo 2D e Modelo 3D de uma lâmpada.

O objeto lâmpada é gerado em 3D através da composição de primitivas gráficas como cilindro e esfera. O código 5.6.3 apresenta os métodos de desenho da lâmpada em 2D e em 3D executado através da sobrecarga dos métodos de desenho do objeto Load.

```

1  public override void draw2D()
2  {
3      GL.glPushMatrix();
4      // verifica se o objeto está selecionado
5      // o objeto selecionado é desenhado em vermelho
6      if (Selected)
7          ColorObj = Color.Red;
8      else
9          ColorObj = Color.Orange;
10     // chama o método de desenho 2D da lampada
11     // com os argumentos centro (ponto), raio e a cor
12     drawCirc(new PointF(posBase.x, posBase.z), r, ColorObj);
13     GL.glPopMatrix();
14 }
15 public override void draw3D()
16 {
17     GL.glPushMatrix();
18     GL.glTranslatef(posBase.x ,posBase.y  , -posBase.z );
19
20     if (Selected)
21         ColorObj = Color.Orange;
22     else
23         ColorObj = Color.Yellow ;
24
25     GL.glScalef(0.5f,0.5f,0.5f);
26     // desenha a esfera
27     drawSphere(r, ColorObj );
28     GL.glRotatef(-90,1,0,0);
29     // desenha o cilindro
30     drawCylinder(r, r, 1.35*r);
31
32     GL.glPopMatrix();
33
34 }

```

Código 5.6.3: Códigos para desenho da lâmpada.

Tomada

O objeto tomada, Figura 5.17, é representado geometricamente em 2D a partir de um ponto de inserção combinado com um ângulo com a parede. E, então é mapeado em 3D em um formato pré-definido que dependa apenas dos dois parâmetros mencionados.

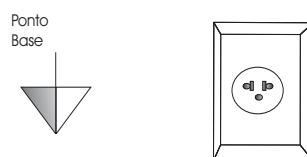


Figura 5.17: Modelo 2D e Modelo 3D de uma tomada.

O código 5.6.4 apresenta os métodos de desenho da tomada em 2D e em 3D executado através da sobrecarga dos métodos de desenho do objeto Load.

```
1 public override void draw2D()
2 {
3     // chama a função de desenho da tomada
4     drawTomada2D(posBase.x, posBase.z, angle );
5 }
6
7 public override void draw3D()
8 {
9     GL.glPushMatrix();
10    float ang_ = angle + 90;
11    GL.glTranslatef(posBase.x, posBase.y, -posBase.z);
12    GL.glRotatef(ang_, 0, 1, 0);
13    if (Selected)
14        ColorObj = Color.Orange;
15    else
16        ColorObj = Color.White;
17    float dX = 0.2f,
18        dY = 0.4f,
19        dZ = 0.04f;
20    // desenha cada objeto em uma posição
21    drawTomada(dX, dY, dZ, ColorObj); // multiplicado por 6
22    GL.glTranslatef(0, 0, 1.006f * dZ / 2);
23    drawCirculo(0.1f, Color.Gray);
24    GL.glTranslatef(0, -dY/8, 0.001f);
25    drawCirculo(dX/8, Color.Black);
26    GL.glTranslatef(dX/4, dY/4, 0.001f);
27    drawCirculo(dX/8, Color.Black);
28    GL.glTranslatef(-dX/2, 0, 0);
29    drawCirculo(dX/8, Color.Black);
30    GL.glPopMatrix();
31 }
```

Código 5.6.4: Códigos para desenho da tomada.

Eletroduto

O objeto eletroduto, Figura 5.18, é representado simplesmente por uma polyline em 2D e por uma tubulação em 3D. O eletroduto percorre uma trajetória a fim de interligar duas cargas elétricas.

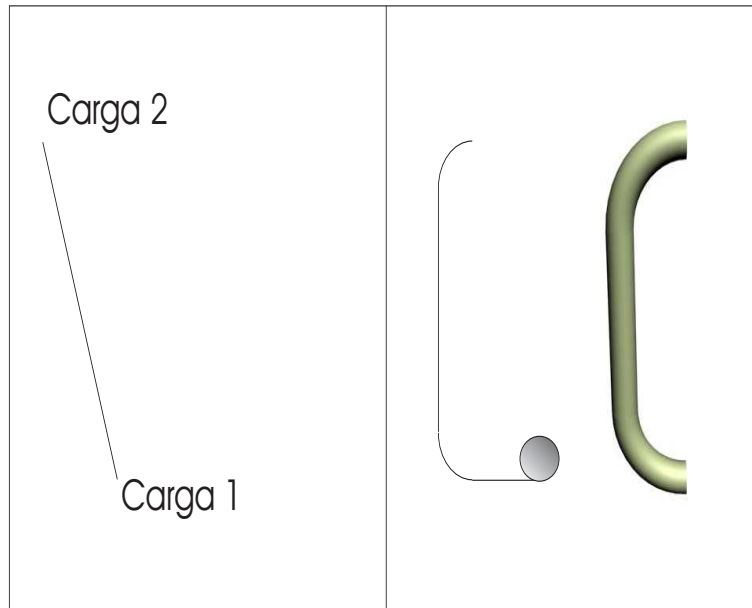


Figura 5.18: Modelo 2D e Modelo 3D de um eletroduto.

5.6.3 Implementação da Lista Arquitetônica

A *Lista Arquitetônica* é formada por objetos do tipo *Wall* e *Obstacle* contendo um atributo que é uma lista de pontos do polígono correspondente no desenho. O sistema percorre a lista a cada evento *onPaint()* executando os métodos de desenho (*painting2D()* e *painting3D()*) para modelar os objetos arquitetônicos. O código 5.6.5 refere-se ao método *draw2D()* responsável pela modelagem dos objetos 2D da lista.

```
1 public void draw2D()
2 {
3     int nM = list_Arquitetura.Count;
4     for (int ki = 0; ki < nM; ki++)
5     {
6         int num0 = ki + 1;
7         Architecture pare = (Architecture) list_Arquitetura["p" +
8                                     num0.ToString()];
9         if (pare.GetType().ToString() == "appGL.Obstacle")
10        {
11            IDictionaryEnumerator enumerator = grafoGL.Arcs.GetEnumerator();
12            while (enumerator.MoveNext())
13            {
14                Obstacle obs = (Obstacle)pare;
15                Conduit elet = (Conduit)enumerator.Value;
16                Load L1 = elet.noStart,
17                    L2 = elet.noEnd;
18                PointF point1 = new PointF(L1.Position.x, L1.Position.z),
19                    point2 = new PointF(L2.Position.x, L2.Position.z);
20                bool interC= obs.Intercepted_by(point1, point2);
21                if (interC)
22                    elet.drawWithObs(obs);
23            }
24        }
25        pare.draw2D();
26    }
27 }
28 }
```

Código 5.6.5: *Percorrendo a lista de objetos arquitetônicos.*

5.7 Considerações sobre um projeto genérico

Hoje é grande a necessidade de interoperabilidade entre os sistemas na área de AEC¹⁷ e entre os processos de colaboração e informações [Edicy 2005]. Um sistema genérico auxiliaria o trabalho colaborativo entre diversos outros tipos de projetos na área, por exemplo, de instalações prediais (projetos elétrico, hidráulico, sanitário, redes de TV a cabo, telefonia fixa, alarme, cabeamento estruturado e ar-condicionado) detectando, na mesma planta arquitetônica, possíveis conflitos. As Figuras 5.19, 5.20 e 5.21 mostram, respectivamente, os projetos arquitetônico, hidráulico e elétrico de uma casa.

¹⁷Arquitetura, Engenharia e Construção

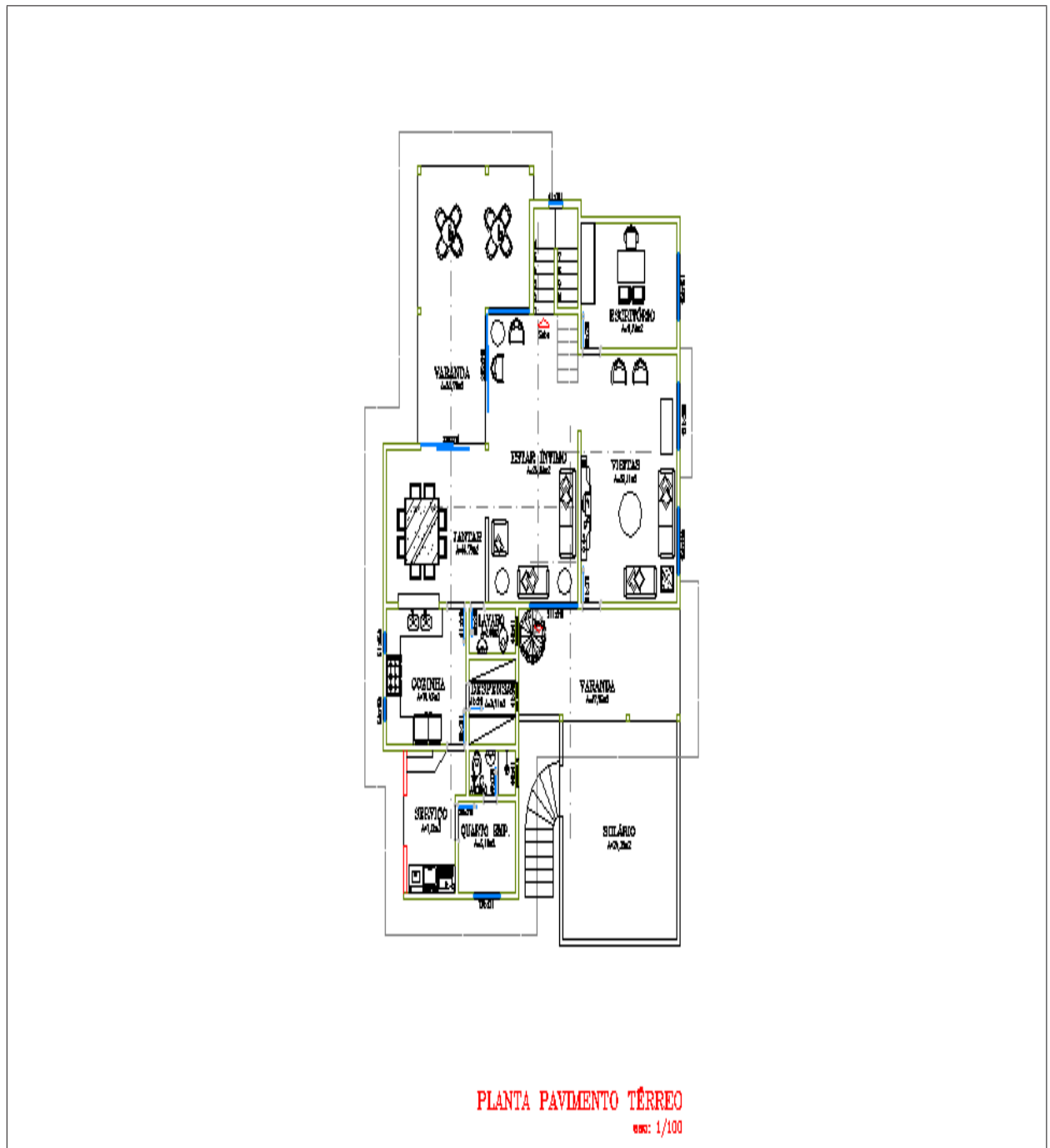


Figura 5.19: Projeto arquitetônico de uma residência.

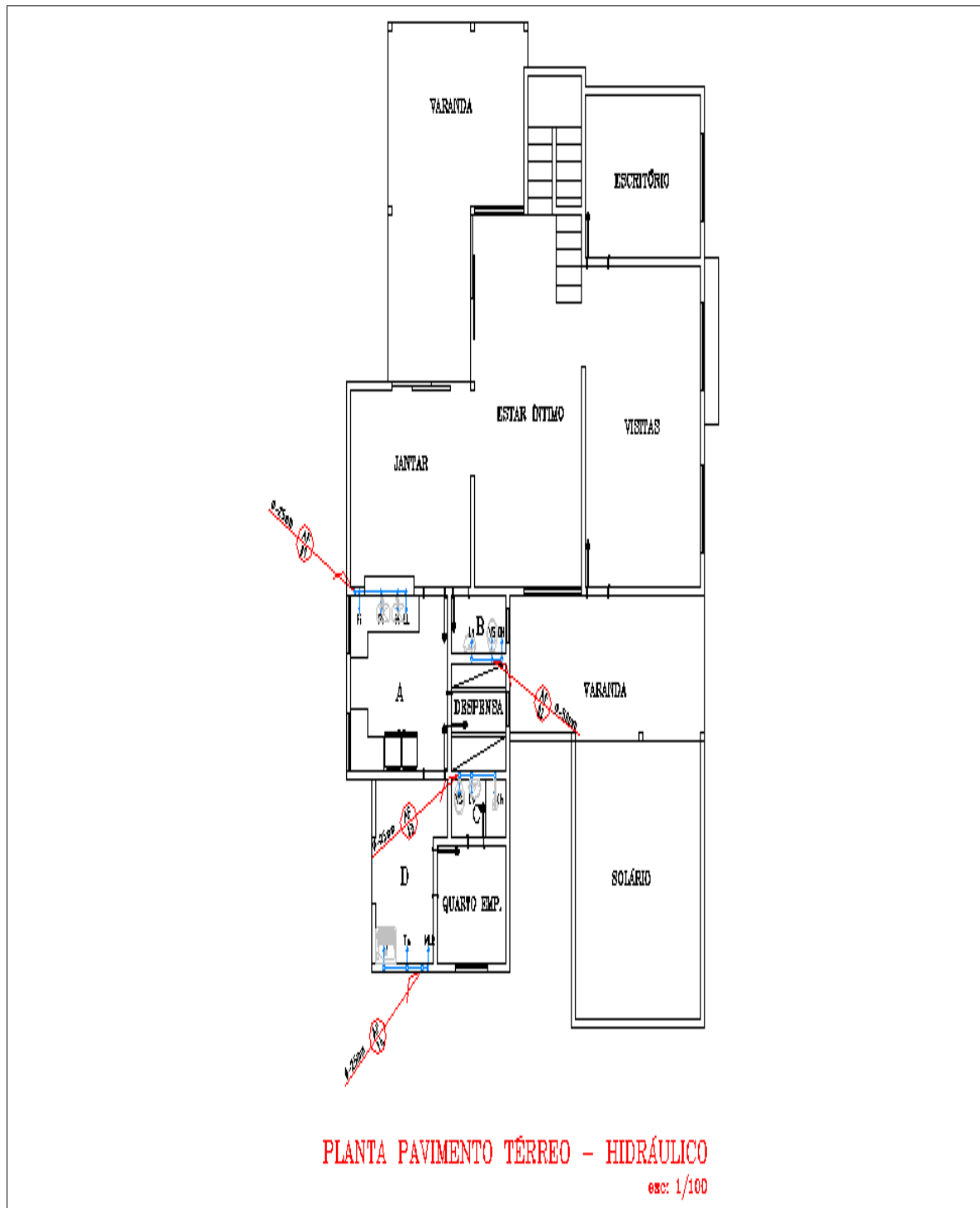


Figura 5.20: Projeto hidráulico de uma residência.

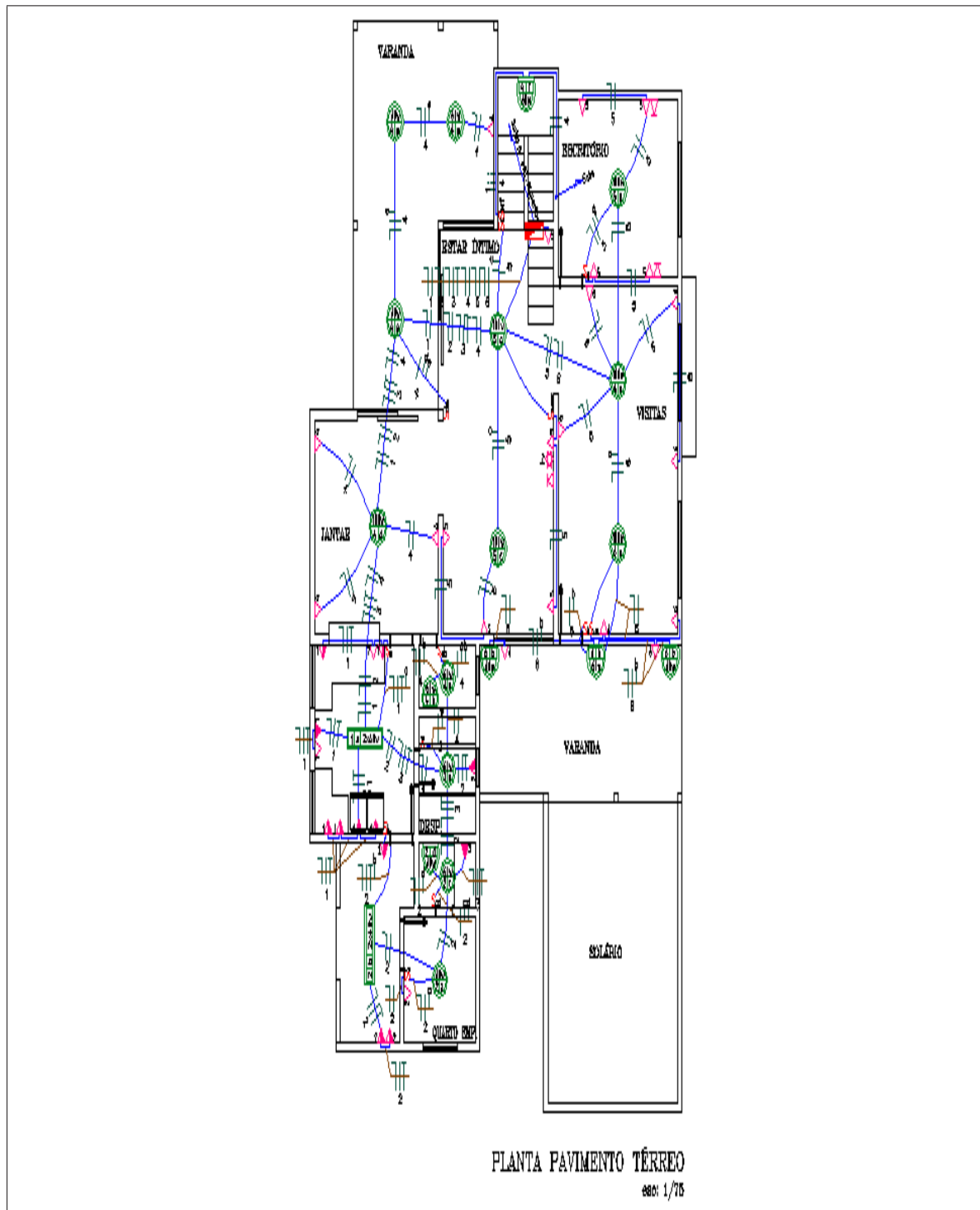


Figura 5.21: Projeto elétrico de uma residência.

[Meiguins et al. 2005] apresenta um trabalho em RA (Realidade Aumentada)¹⁸ que gera uma visualização tridimensional dos projetos arquitetônico, hidráulico e elétrico, a partir de marcadores predefinidos, possibilitando uma troca de informações entre os profissionais envolvidos nos diversos projetos. Entretanto, o fato de representar uma casa virtual e ao mesmo tempo algo real, uma parede por exemplo, complementando a cena, inviabiliza detalhes do projeto pois a câmera não consegue capturar toda a cena real. A casa virtual apresenta todos os detalhes dos projetos previamente conhecidos e nela o usuário pode navegar e visualizar os conflitos. O que se propõe é que um sistema genérico seja capaz de identificar conflitos tanto visualmente através do trabalho colaborativo dos profissionais, como, também, através de algoritmos de colisões entre objetos de diferentes projetos. A Figura 5.22 mostra como o sistema controlaria todos os projetos.

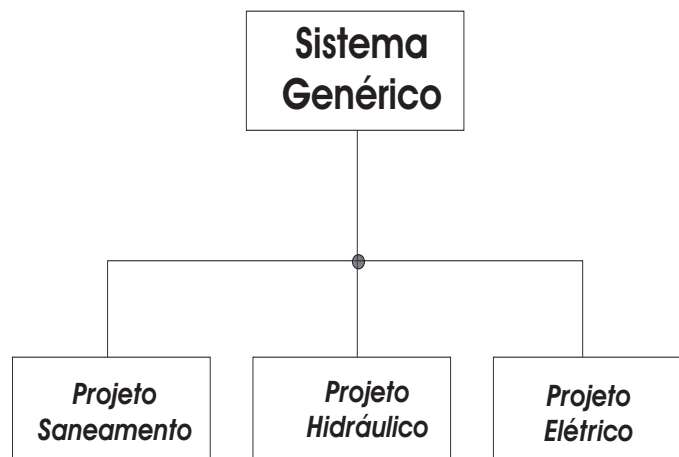


Figura 5.22: Sistema genérico.

Cada projeto possuiria um grafo correspondente e o sistema, com a arquitetura semelhante à da Figura 5.23, alertaria o usuário, caso ele tente finalizar um dos projetos, quando elementos de um grafo “colidissem” com elementos de outro.

¹⁸A Realidade Aumentada faz a combinação do mundo real com objetos virtuais produzidos por computador, gerando um único ambiente que pode ser visualizado através de um monitor [Azuma 1997] ou algum dispositivo especial, como por exemplo, um capacete de Realidade Virtual (HMD - Head Mounted Displays) [Azuma 2001]

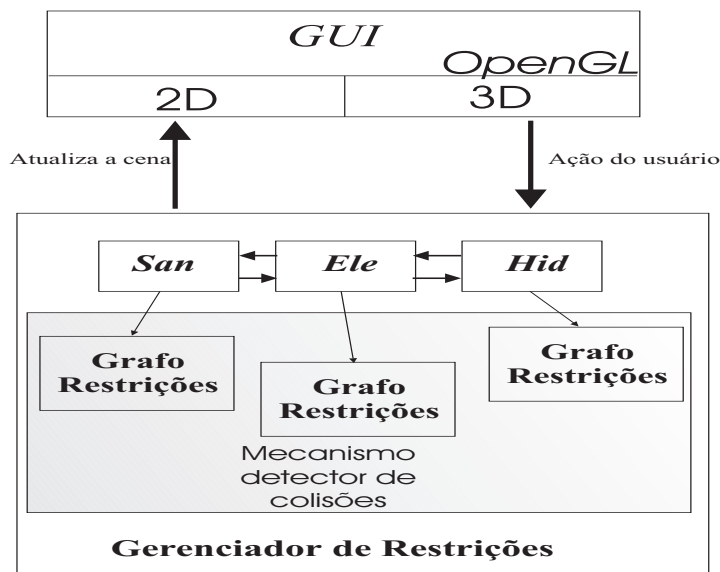


Figura 5.23: Arquitetura do Sistema genérico.

Assim, o usuário poderia perceber possíveis interferências de um projeto hidráulico no elétrico, do estrutural no hidráulico e usar recursos para desvio ou mover pontos de conflito para outra posição a fim de contornar tais problemas. O sistema desenvolvido nesta tese, como já foi destacado, calcula as interferências entre os eletrodutos na malha de teto com possíveis obstáculos arquitetônicos previamente identificados.

5.8 Considerações Finais

Este capítulo descreveu a análise e implementação de um sistema para gerenciar e representar restrições propostas nesta tese. O sistema desenvolvido permite a representação e a satisfação das restrições geométricas em um projeto de instalações elétricas através da abordagem da construção geométrica. O sistema está composto de três componentes principais: a Interface Gráfica com Usuário (*GUI*), o Grafo de Restrições, a Lista de elementos arquitetônicos e o Gerenciador de Restrições. A (*GUI*) suporta as principais tarefas de fluxos de arquivos e de manipulações de objetos gráficos. O Grafo de Restrições mantém uma representação da instalação elétrica. A Lista Arquitetônica permite ao usuário visualizar/navegar em uma instalação elétrica projetada em ambientes bi e tri-dimensionais. O Gerenciador de Restrições estabelece uma ponte entre o grafo e a (*GUI*). O capítulo também descreveu as principais classes utilizadas no sistema proposto. O próximo capítulo apresentará as principais características do sistema desenvolvido, a partir de um estudo de caso, com os resultados obtidos e discutirá suas vantagens e limitações.

Capítulo 6

Resultados, Discussões e Melhoramentos

6.1 Introdução

O propósito deste capítulo é demonstrar as principais características do sistema baseado em restrições discutido nos capítulos anteriores através de um estudo de caso: instalação elétrica em uma residência padrão. Os resultados das avaliações do sistema por estudantes e engenheiros eletricitas também são apresentados e analisados através de gráficos. Finalmente, são apresentados as limitações do sistema desenvolvido, além de sugestões de melhorias.

6.2 Principais Características do sistema desenvolvido

As principais características do sistema desenvolvido nesta tese e que são discutidas neste capítulo, incluem:

- Natureza incremental;
- Formação automática da malha de teto;
- Eficiência energética;
- Seqüência Didática de Projeto;
- Visualização/Interação em 2D/3D;
- Dimensionamento automático;
- Detecção de obstáculos.

6.2.1 Estudo de Caso

O projeto de uma instalação elétrica de uma residência padrão classe média (3 quartos, sala de estar, sala de jantar, área de serviços, cozinha etc) é usado como estudo de caso a fim de ilustrar as características do *arqElectrical*.

A Figura 6.1 mostra o *arqElectrical* com o desenho 2D/3D gerados a partir da leitura do arquivo no formato *dxf* correspondendo à planta baixa da residência.

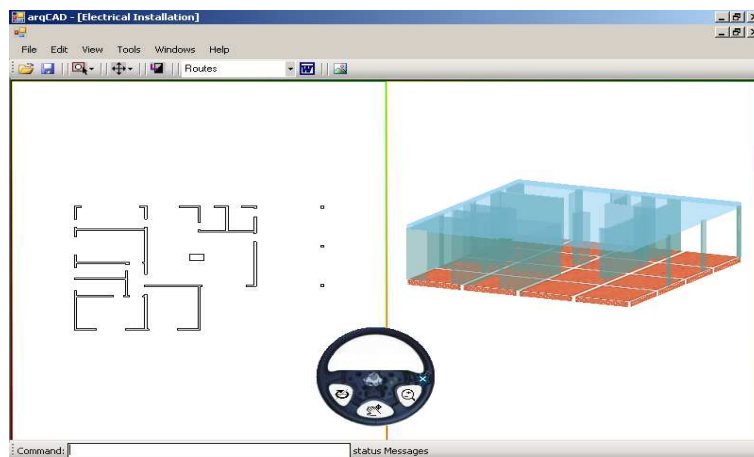


Figura 6.1: Planta baixa do estudo de caso

Inserindo cargas elétricas

O usuário insere pontos de energia tomando como base a planta arquitetônica. A primeira carga a ser inserida deve ser uma lâmpada localizada no teto da residência, isto porque, as tomadas, outro tipo de carga, necessitam da existência de cargas no projeto para o traçado automático de eletroduto. Lâmpadas são inseridas e dimensionadas a partir da delimitação de uma área que corresponderá ao ambiente a ser iluminado. Outros parâmetros (tipo de ambiente, cor das paredes) podem ser fornecidos conforme o método luminotécnico utilizado na determinação da potência da carga. A base da lâmpada dimensionada é uma caixa octogonal que serve principalmente como ponto de derivação dos eletrodutos que interligam todas as cargas no teto.

A Figura 6.2 mostra o projeto atual com cinco pontos de energia lançados no teto e a malha de eletrodutos sendo formada para atender a estas cargas. A caixa de diálogo permite ao usuário colocar os demais parâmetros necessários a cada ambiente a ser iluminado. Os parâmetros mencionados acima variam conforme o método luminotécnico escolhido pelo usuário, que pode ser: *densidade de potência W/m^2 ou lúmens*.

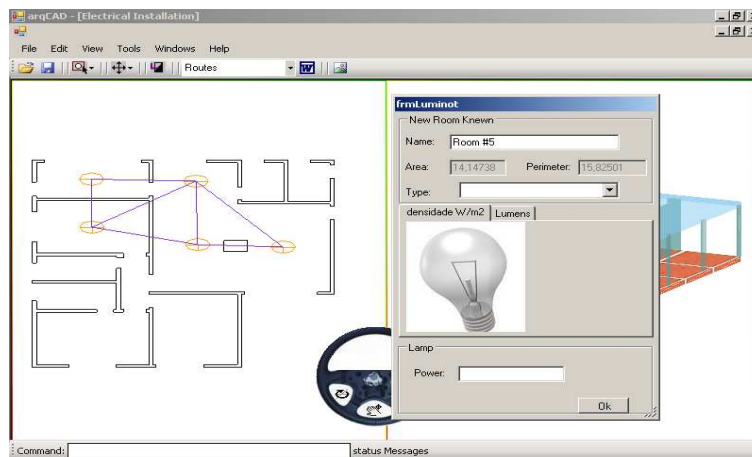


Figura 6.2: Projeto elétrico evidenciando a malha de eletrodutos e pontos de energia no teto

As restrições, conforme explicado nos capítulos anteriores, são satisfeitas assim que o usuário conclui a formação da malha de teto ou incrementalmente ao inserir tomadas para aparelhos eletro-eletrônicos.

Continuando com o estudo de caso, considere agora a inserção de uma tomada t no projeto, conforme mostra a Figura 6.3.

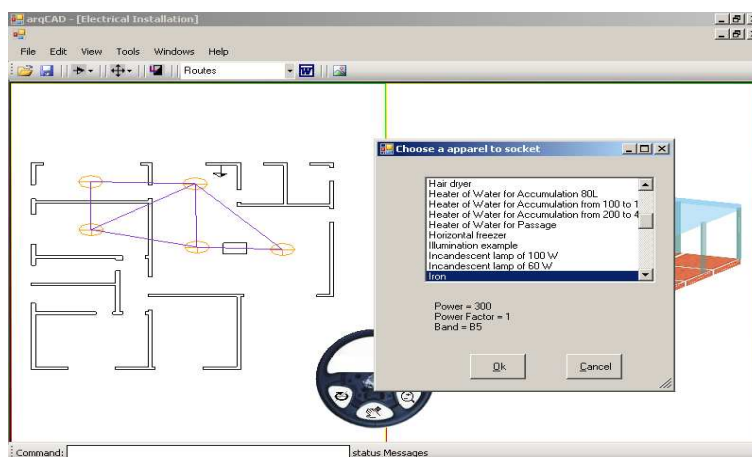


Figura 6.3: Restrição eletroduto entre uma tomada e uma carga existente.

O *Gerenciador de Restrições* procura no *Grafo de Restrições* informações para posicionar as duas cargas e atualizar o grafo com um arco orientado da carga existente para a nova carga (tomada t). A Figura 6.4 ilustra esta situação.

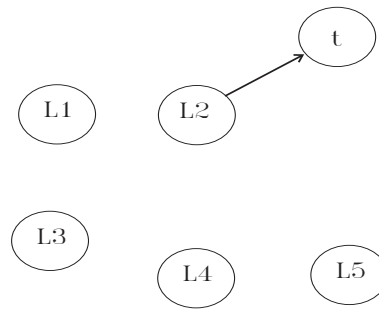


Figura 6.4: *Grafo de Restrições* atualizado após a inserção da tomada t .

Identificando obstáculos

Durante a realização do projeto, o sistema atravessa o *Grafo de Restrições* chamando métodos de desenhos 2D/3D dos objetos elétricos correspondentes no grafo, vértices (cargas) e arcos (eletrodutos). O mesmo acontece com os objetos arquitetônicos pertencentes a *Lista Arquitetônica*. As colunas são objetos arquitetônicos que devem ser identificadas durante a construção do projeto por serem possíveis obstáculos para a malha de eletrodutos.

A Figura 6.5 mostra uma coluna identificada previamente pelo usuário durante a construção do projeto. Neste caso, o sistema pede ao usuário a altura da coluna. Mais tarde, quando a malha estiver finalizada, os eletrodutos que interceptariam tal obstáculo terão suas trajetórias desviadas.

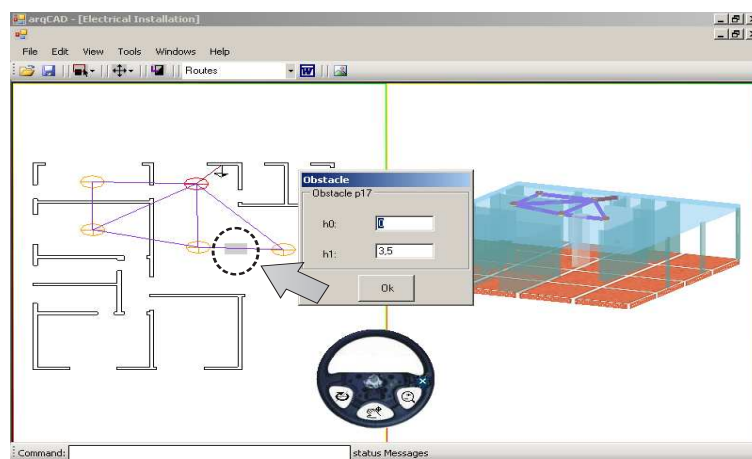


Figura 6.5: Identificando um obstáculo no desenho.

Com a carga instalada definida, quando necessário, o sistema calcula a demanda e consulta a tabela da concessionária para definir o tipo de fornecimento de energia (monofásico, bifásico ou trifásico).

Roteamento

O lançamento do quadro de distribuição e as saídas destes definem rotas na malha de eletrodutos localizadas no teto. A Figura 6.6 mostra uma rota na malha de teto evidenciando o menor caminho, de acordo com a direção das setas, para todas as cargas do projeto. Ela mostra um *eletroduto*, em curva, que foi desviado automaticamente do obstáculo anteriormente identificado durante o projeto (Figura 6.5).

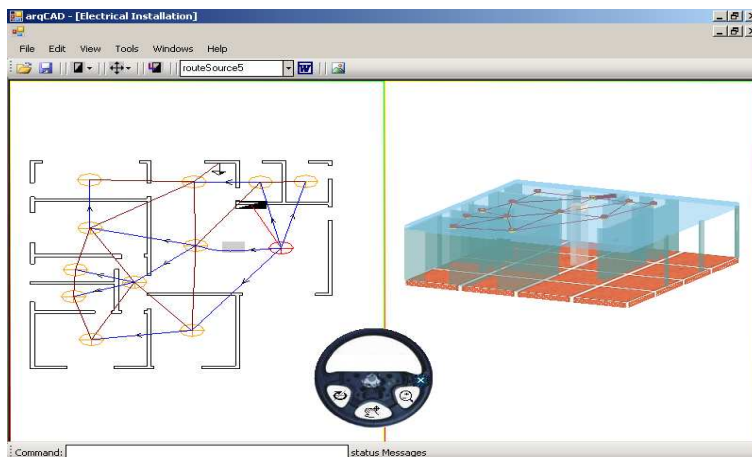


Figura 6.6: Uma rota destacada na malha.

Estas rotas são utilizadas na etapa de formação de circuitos onde os condutores e eletrodutos são automaticamente dimensionados.

Manipulação direta de objetos

O *arqElectrical* permite manipular objetos (cargas elétricas) da instalação elétrica. A carga elétrica (lâmpada ou tomada) pode ser arrastada, com o uso do mouse, para outra posição do desenho 2D e/ou 3D. Apenas os valores correspondentes ao atributo posição do vértice (carga manipulada no desenho) são alterados. Assim, os eletrodutos ligados ao objeto manipulado continua existindo no desenho e o grafo mantém-se na sua configuração normal.

Formação de circuitos

Os parâmetros dos circuitos tais como: tensão, resistividade dos condutores, temperatura ambiente, rota a ser utilizada, devem ser fornecidos pelo usuário. Alguns valores são “default” mas podem ser alterados através da caixa de diálogo mostrada na Figura 6.7.

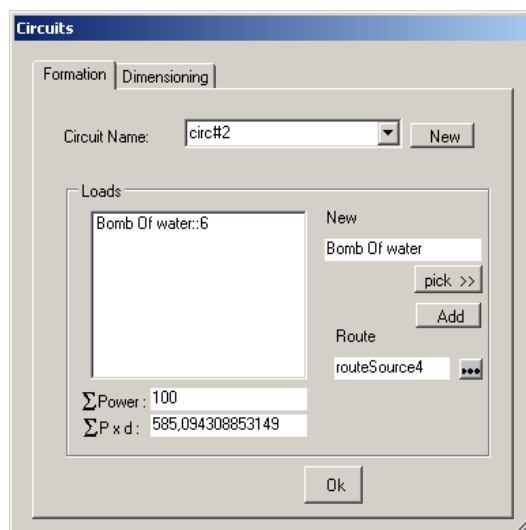


Figura 6.7: Caixa de diálogo para a formação de circuitos.

Assim que o usuário insere cargas elétricas ao circuito, o sistema calcula automaticamente a seção dos seus condutores e eletrodutos. Neste momento, uma mensagem de alerta poderá ser enviado ao usuário caso o diâmetro de algum trecho de eletroduto ultrapasse o valor padrão de 25 mm em função do dimensionamento do circuito em questão.

Finalmente, o usuário pode emitir um relatório correspondente ao memorial descritivo da instalação como é mostrado na Figura 6.8.

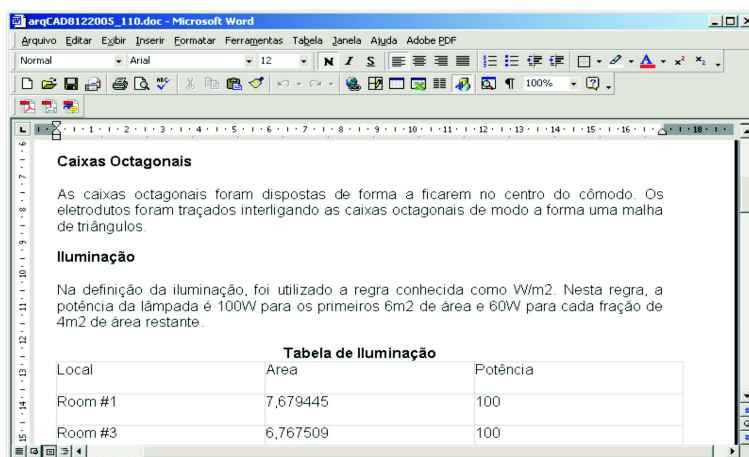


Figura 6.8: Memorial descritivo da instalação elétrica.

O relatório gerado contém uma descrição das etapas da instalação bem como tabelas das cargas de iluminação e tomadas, além da especificação de cada circuito formado.

6.2.2 Natureza incremental

A *Natureza Incremental* do sistema é avaliado durante a inserção de cargas de força (tomadas para eletrodomésticos) no projeto e, durante a inserção de cargas elétricas em circuitos da instalação.

Conforme foi mostrado nas Figuras 6.3 e 6.4 do estudo de caso, a acomodação de uma nova restrição *eletroduto* após a inserção de uma tomada *t* no projeto envolveu apenas os dois vértices correspondentes a tomada e a carga existente (indicada pelo usuário). Com isto, identificou-se que a atualização do grafo é local e não há a necessidade de atravessar o grafo re-satisfazendo todas restrições.

Um outro exemplo, com esta característica, pode ser observado durante a formação dos circuitos elétricos da instalação. O dimensionamento dos condutores de energia, quando o usuário adiciona cargas elétricas a um circuito formado é automático. O sistema percorre o grafo no sentido inverso até alcançar a malha de eletrodutos, a partir daí, usa-se uma rota já definida, para calcular a distância até o quadro de distribuição e com isto dimensionar a seção dos condutores do circuito em questão, pelo critério *queda de tensão* (ver Capítulo 4 e Apêndice 1). A Figura 6.9 mostra o percurso no grafo, quando a carga *b* foi adicionada a um determinado circuito.

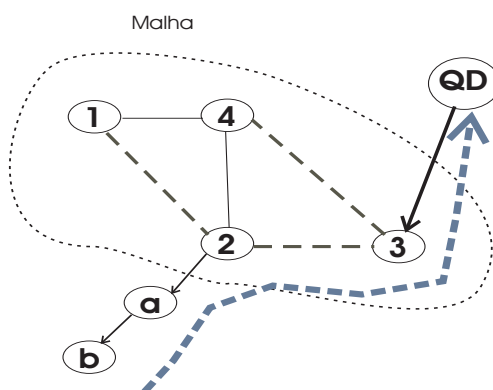


Figura 6.9: Caminho no grafo para o cálculo da distância da carga *b* ao *QD*.

Isto mostra o dimensionamento incremental dos condutores de um circuito quando determinada carga é adicionada ao mesmo.

6.2.3 Formação Automática da Malha de Teto

O sistema faz todo trabalho tedioso, conforme foi apresentado pelo estudo de caso, de criar a tubulação no teto através da interligação das caixas octogonais. Trabalho este que normalmente é feito manualmente pelo projetista. Ao invés disto, o engenheiro

lança os pontos de energia, juntamente com as caixas octogonais, no teto e o sistema forma, automaticamente, uma malha de triângulos cujos lados são arcos no grafo representando possíveis eletrodutos. A malha é dinamicamente alterada no desenho através da inserção de caixas octogonais no teto (vide Figura 6.10).

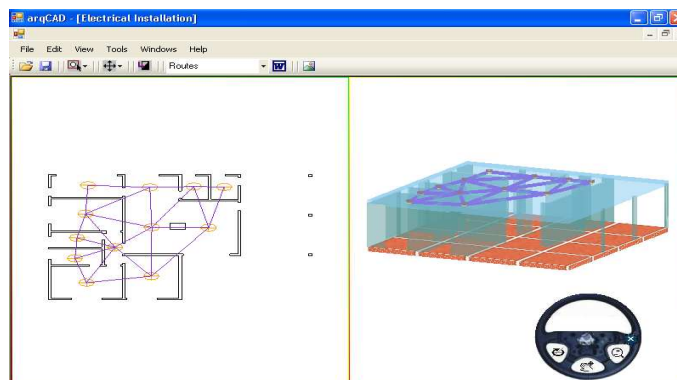


Figura 6.10: Formação automática da malha de eletrodutos a partir de pontos de energia no teto

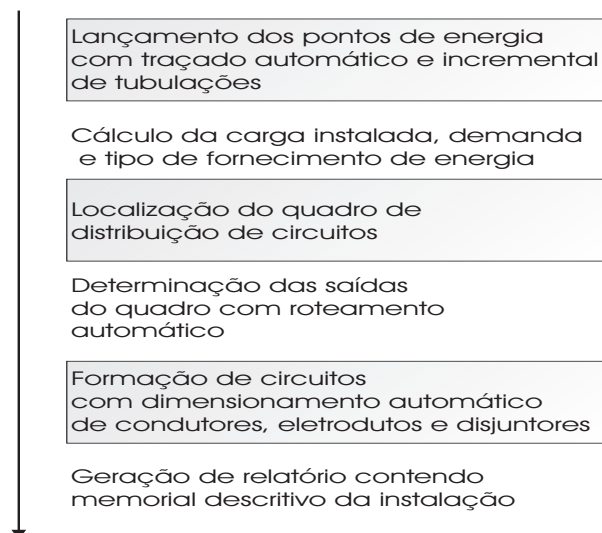
A malha de eletrodutos é a base da instalação por onde os condutores dos circuitos elétricos terão rotas alternativas para alcançar as diversas cargas.

6.2.4 Eficiência energética

A eficiência energética do sistema é constatada pela escolha, automática, dos menores caminhos dos eletrodutos por onde passarão os condutores dos circuitos da instalação e pelo posicionamento do quadro de distribuição nas proximidades do centro de carga estando, conseqüentemente, mais próximo das maiores cargas. Com isto, busca a consciência para o aproveitamento racional de energia elétrica evitando desperdícios de material e de energia que geralmente ocorre em condutores longos.

6.2.5 Seqüência Didática de Projeto

A concepção de um ferramenta *CAD/CAE* que auxilie o professor em aulas de instalações elétricas e, que seja utilizado na evidência dos resultados de cada etapa do projeto facilitando, assim, a compreensão por parte dos alunos. A seguir é apresentado uma descrição das principais etapas de um projeto de instalação elétrica que pode ser abordado didaticamente em sala de aula.



A seqüência determinada pela interação sistema/usuário facilita o aprendizado da elaboração de projetos de instalações elétricas podendo ser utilizado em salas de aulas desta disciplina. Deve-se ressaltar que esta seqüência de projeto está de acordo com a maioria dos livros adotados nas faculdades de engenharia e, baseia-se na experiência prática de profissionais que vivenciaram a prática e o ensino da disciplina. Outras ferramentas podem ser utilizadas para a mesma finalidade, entretanto, tais ferramentas partem de um pressuposto que o usuário já saiba fazer o projeto de instalação manualmente (usando calculadora e um software para desenho).

6.2.6 Visualização/Interação em 2D/3D

Trabalhar e acompanhar o projeto tendo uma visualização 3D é uma realidade deste sistema. A exibição de uma casa virtual com paredes, piso, teto e toda a instalação elétrica 3D possibilita ao usuário a sensação de navegar pela casa, antes da mesma ser construída com uma noção muito intuitiva da distribuição das cargas elétricas e das tubulações.

O usuário pode ajustar pontos de energia em 3D e visualizar o seu efeito no ambiente 2D, e vice-versa.

6.2.7 Dimensionamento automático

O dimensionamento automático de eletrodutos e condutores é uma característica do *arqElectrical* e da maioria dos sistemas comerciais existentes no mercado. A diferença é a natureza incremental, explicada anteriormente, que é utilizada pelo *arqElectrical* e que certamente não é utilizada pelos outros sistemas pois o dimensionamento é feito

após o comando do usuário.

O sistema mantém atualizada a seção dos condutores de cada circuito da instalação. Se, em um determinado momento do projeto, o engenheiro resolver tirar uma determinada carga de um circuito e acrescentar em outro, as seções dos condutores dos circuitos alterados são automaticamente atualizadas sem a necessidade de acionar os cálculos de dimensionamento como geralmente é feito por outros sistemas.

6.2.8 Detecção de obstáculos

O sistema detecta possíveis obstáculos (identificados previamente pelo usuário) com a malha de teto. Nesta tese, os obstáculos são devidos a colunas. A idéia pode ser estendida para o sistema suportar a detecção de obstáculos diversos conforme abordado no sistema genérico do Capítulo 5.

6.2.9 Comparação com trabalhos anteriores

O propósito desta seção é discutir as vantagens deste trabalho em comparação com trabalhos anteriores na literatura e com algumas ferramentas comerciais existentes de mesma finalidade. As tabelas comparativas com trabalhos anteriores foram apresentadas no Capítulo 2 sendo explicadas as características utilizadas para comparação.

A Tabela 6.1 apresenta uma comparação geral do sistema desenvolvido, o *arqElectrical*, com relação aos sistemas baseados em restrições geométricas. O cálculo da complexidade dos algoritmos é baseado no número de elementos geométricos n e o no número de restrições m . Sendo n_1 um número parcial de entidades geométricas, o que significa $n_1 < n$.

Tabela 6.1: Sistemas baseados em restrições

	Dimension	GCE	D-Cubed	SkyBlue	INCES	<i>arqElectrical</i>
Referência	Gossard 1982	Kramer 1994	Owen 1991	Sannella 1994	Lamounier 1996	Tese 2006
Complexidade	$O(n^3)$	$O(nm)$	$O(n^2)$	$O(m^2)$	$O(n^3)$	$O(n_1^3)$
Incremental	×	×	×	✓	✓	✓
Manipulação Direta	×	×	×	✓	✓	✓

O sistema desenvolvido possui características semelhantes a sistemas *CAD/CAE* baseados em restrições aplicados em áreas diversas. Em termos de complexidade de algoritmos, ele é eficiente podendo ainda ser melhorado conforme tema abordado no Capítulo 4.

A Tabela 6.2 apresenta a comparação do *arqElectrical* com relação a alguns sistemas *CAD/CAE* representativos para instalações elétricas encontrados no mercado.

Tabela 6.2: Características de Ferramentas CAD para Instalações Elétricas

	Lumine	CAD/Elet	PRO-Elétrica	Autopower	<i>arqElectrical</i>
Visualização 3D	✓	×	✓	×	✓
Two-way	×	×	×	×	✓
Seqüência didática	×	×	×	×	✓
Lançamento automático de eletrodutos	×	×	×	×	✓
Menor caminho	×	×	×	×	✓
Dimensionamento automático	✓	✓	✓	✓	✓
Construção incremental	✓	×	×	×	✓
Vínculo com o AutoCAD	×	✓	✓	✓	×
Detecção de Obstáculos	×	×	×	×	✓

O sistema apresenta diversas características que o diferencia em relação a diversos sistemas comerciais. Entretanto, por ser um protótipo ainda não possui todas as funcionalidades básicas desenvolvidas.

6.3 Verificação do Funcionamento do Sistema

O *arqElectrical* foi apresentado a 27 (vinte e sete) usuários, profissionais e estudantes de Engenharia Elétrica e/ou Arquitetura que já fizeram a disciplina de instalações elétricas. Inicialmente, foi explicado o objetivo do sistema, seu funcionamento e suas características, considerando o foco de demonstrar a viabilidade de uma ferramenta CAD/CAE destinado a projetos de instalações elétricas residenciais. Analisando as respostas do questionário, foi possível identificar e avaliar considerações pertinentes ao tema proposto. A seguir, são enumeradas as questões que foram apresentadas aos usuários considerando os gráficos gerados para a análise.

A primeira questão “Você trabalha ou já trabalhou com projetos de instalações elétricas?” procurou identificar a experiência dos usuários com relação a construção de projetos. Nota-se no gráfico da Figura 6.11 que a maioria dos usuários já possui essa experiência cujo tempo, observado no questionário, varia de um a vinte anos. Os

entrevistados que responderam não são estudantes que ainda não tiveram oportunidade para trabalhar com projetos.

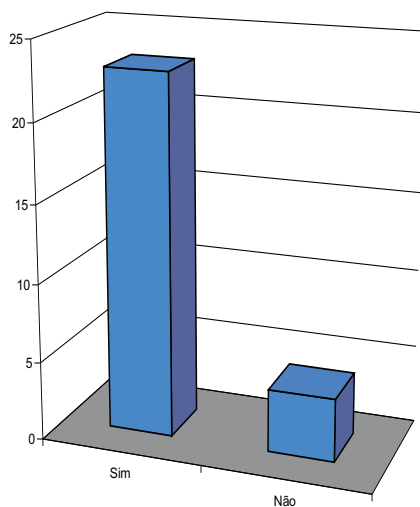


Figura 6.11: Experiência em projetos de instalações elétricas.

Na segunda questão “Você já usou algum software de instalações elétricas?” buscou identificar se os entrevistados já haviam utilizados algum tipo de software para realizar projetos de instalações elétricas. Um fato extremamente importante verificado nas respostas desta pergunta, conforme mostra o gráfico 6.12, é a existência de um grande número de profissionais e estudantes que ainda não tiveram a oportunidade de manusear um sistema *CAD/CAE*. Atualmente, o computador tornou-se acessório indispensável em qualquer atividade profissional e a explicação para este fato é que a maioria dos entrevistados exerce outra atividade diferente da atividade de projetista. O uso de *CAD/CAE* em aulas da disciplina instalações elétricas esta sendo implantado durante este último ano de 2005 na Universidade Federal de Uberlândia onde foi realizada a entrevista. O professor continua a ensinar os conceitos e cálculos relacionados no desenvolvimento de projetos de instalações elétricas, sendo o software um sistema automático de projetos que possa confirmar o que foi aprendido.

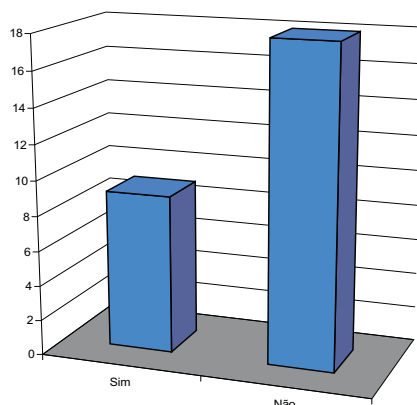


Figura 6.12: Uso de software em instalações elétricas.

As questões de 3 a 14, inspiradas na norma ISO/IEC 9126 (NBR 13596), são na verdade afirmações a respeito da funcionalidade, da usabilidade¹⁹ e da eficiência do sistema. Questões estas em que o usuário as classificavam em uma escala de 1 a 5 correspondente aos conceitos que vão de fraco a muito bom.

As funcionalidades “*Seqüência exigida pelo sistema para a construção do projeto*”, “*Visualização e atualização simultânea em dois ambientes gráficos 2D/3D objetivando facilitar o acompanhamento do projeto*” e “*Inserção automática da tubulação na instalação elétrica*” avaliadas de acordo com as respostas dos usuários são destacadas no gráfico da Figura 6.13.

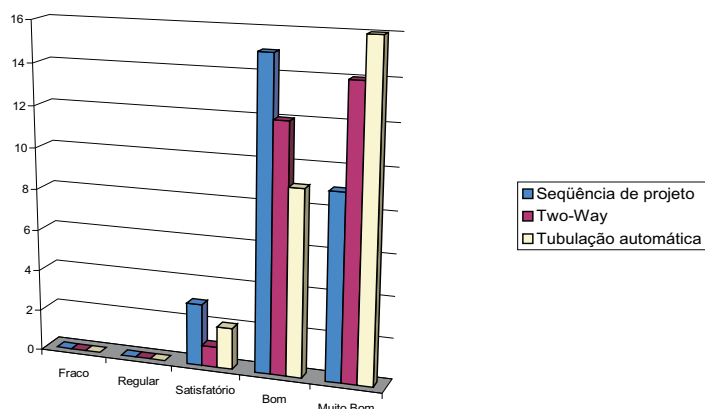


Figura 6.13: Funcionalidades do *arqElectrical*.

A funcionalidade “Two-way” foi considerada de **boa a muito boa**. Já a funcionali-

¹⁹Pela definição da International Organization for Standardization, usabilidade é a extensão na qual um produto pode ser usado por usuários específicos para alcançar objetivos específicos com efetividade, eficiência e satisfação em um contexto de uso específico (ISO 9241-11). Nesta tese é usado um questionário para verificar alguns aspectos da usabilidade em um teste de avaliação do protótipo desenvolvido.

dade “Tubulação automática” foi considerada **satisfatória** por apenas um usuário. Ele sugeriu que a criação da trajetória da tubulação pudesse ser feita manualmente a fim de se evitar possíveis obstáculos na parede como janelas etc. Esta preocupação não se justifica uma vez que o traçado automático é feito de maneira incremental nas paredes bastando o usuário escolher um ponto próximo àquele que está sendo inserido e, identificando as paredes onde poderão passar as tubulações. Finalmente, a funcionalidade “Seqüência de projeto” foi considerada de **boa a muito boa**, embora alguns usuários considerem que um manual do sistema tornasse mais produtivo o entendimento dessa funcionalidade.

As demais funcionalidades do sistema como “*Dimensionamento automático e incremental de eletrodutos e condutores*”, “*Memorial descritivo*”, “*Desvio de obstáculos*” e “*Cálculo de menor caminho*” foram explicadas para os usuários durante o uso do protótipo. Estas funcionalidades foram consideradas pontos fortes do programa. Algumas correções foram sugeridas no que diz respeito à verificação do sobrecarregamento de eletrodutos durante o dimensionamento automático dos mesmos e a consideração de outros itens como “obstáculos” no que tange a funcionalidade *desvio de obstáculos*. O gráfico da Figura 6.14 ilustra os resultados da avaliação envolvendo as funcionalidades mencionadas.

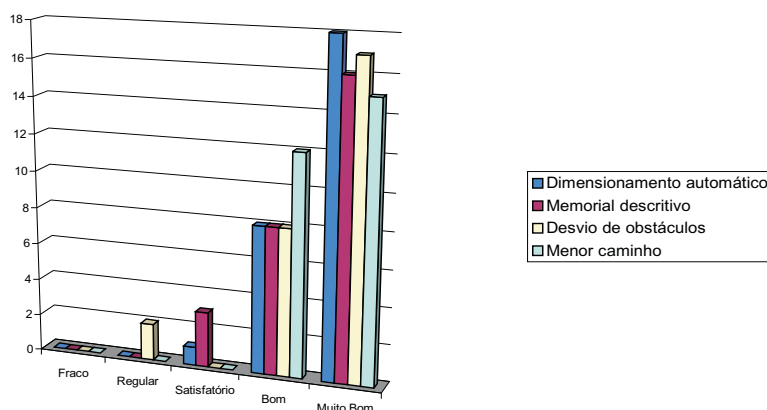


Figura 6.14: Demais funcionalidades do *arqElectrical*.

As questões “*Facilidade em entender os conceitos utilizados*”, “*Facilidade em aprender a usar o sistema*” e “*Facilidade em controlar o sistema*” objetivam medir a usabilidade do sistema. Conforme mostra o gráfico da Figura 6.15, tais características foram consideradas satisfatórias, boas a muito boas. Uma observação que chamou a atenção seria a inclusão de *Help* para facilitar o uso do sistema e uma maior aproximação de

sistema de RV com maior navegação, interação e sensação de imersão.

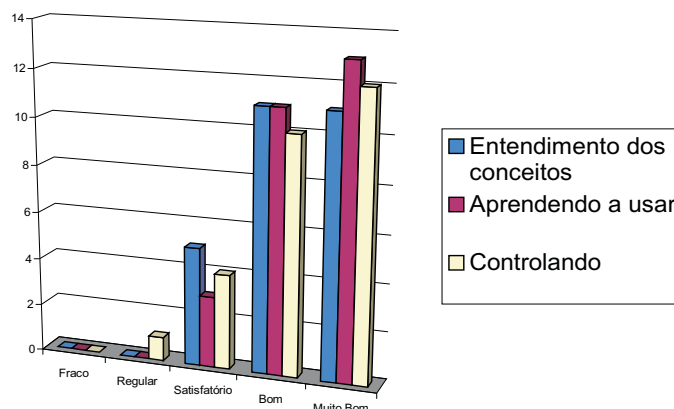


Figura 6.15: Usabilidades do *arqElectrical*.

As afirmações “*Tempo de resposta das funções executadas pelo arqElectrical*” e “*Os recursos utilizados são compatíveis com o nível de desempenho requerido para o produto*” foram pontuadas pelos usuários com o objetivo de medir a eficiência do sistema. O gráfico da Figura 6.16 destaca que a eficiência, observada pelo resultado das questões, foi considerada superior ao nível satisfatório. Entretanto, na opinião dos avaliadores, apenas o ambiente 3D do sistema necessitaria de uma maior rapidez para responder as transformações geométricas.

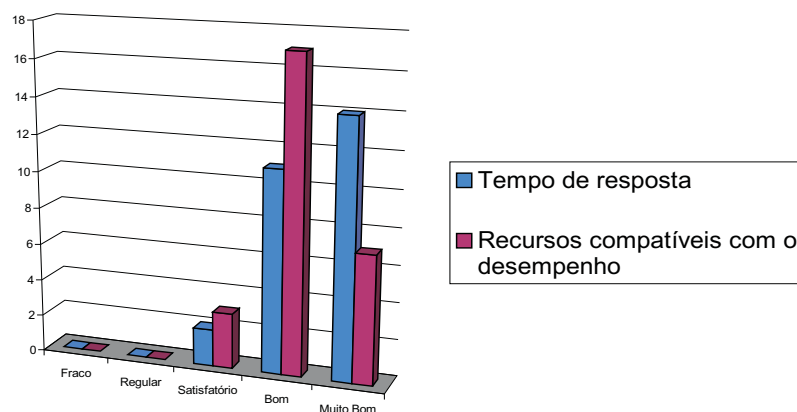


Figura 6.16: Eficiência do *arqElectrical*.

Após as questões (3 a 14) sobre qualidade de software fez-se as questões (15 a 17) relativos ao sentimento do usuário com relação ao *arqElectrical*. A questão “Você recomendaria o uso do *arqElectrical* para o ensino de Instalações Elétricas?” objetivou identificar, junto aos usuários, a necessidade do uso da ferramenta em aulas de instalações elétricas. O gráfico da Figura 6.17 mostra que praticamente todos os usuários

recomendariam o sistema. Aqueles que responderam talvez justificaram que falta testar o sistema em projetos maiores ou que para o uso em sala de aula deveria deixar claro para os alunos os cálculos feitos pelo sistema. Logicamente, estas preocupações são pertinentes e o software não substitui o professor no ensino da disciplina, sendo importante na confirmação do aprendizado.

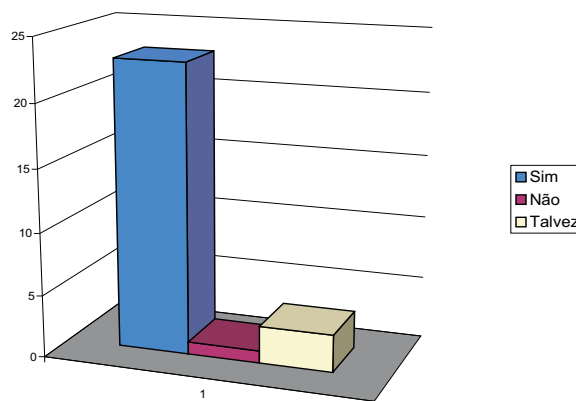


Figura 6.17: Uso do *arqElectrical* no ensino de Instalações elétricas.

A questão “Você o recomendaria para ser usado por profissionais de engenharia elétrica?” tem o objetivo de conhecer o percentual de necessidade de mais uma ferramenta para auxiliar os profissionais da área. O gráfico da Figura 6.18 mostra que a maioria dos entrevistados recomendaria o uso do *arqElectrical* pois ele simplifica o trabalho a produção de projetos. Aqueles que responderam talvez justificaram que falta estender a aplicabilidade para projetos de instalações elétricas prediais.

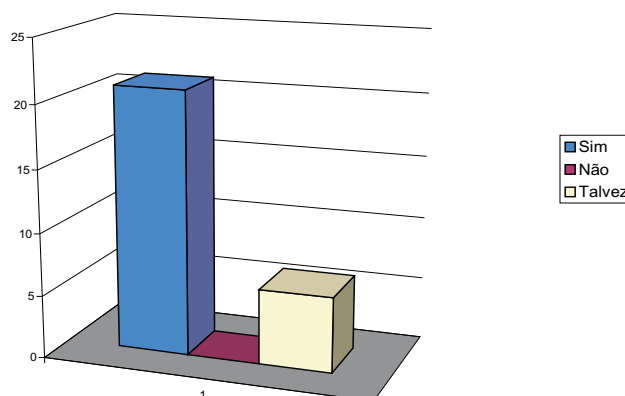


Figura 6.18: Uso do *arqElectrical* por profissionais da área.

A última questão “O fato do *arqElectrical* ser independente do AutoCAD ” serve para posicionar o sistema em relação à maioria dos sistemas existentes que são aplica-

tivos do AutoCADTM. O fato de citar o AutoCAD como uma plataforma para projetos *CAD/CAE* baseia-se em uma pesquisa do departamento de engenharia civil da UFS-Car (Universidade Federal de São Carlos) sobre o perfil dos usuários de *CAD/CAE* no mercado brasileiro [Frosch 2005] onde 94% das empresas pesquisadas o utiliza. O gráfico da Figura 6.19 mostra que a maioria dos avaliadores considera esta independência salutar e importante a variedade de sistemas *CADs* existentes. Entretanto, outros consideram que se o AutoCAD for um sistema utilizado em diversos departamentos de uma empresa a aquisição de seus aplicativos seria mais conveniente em relação ao uso de um novo software.

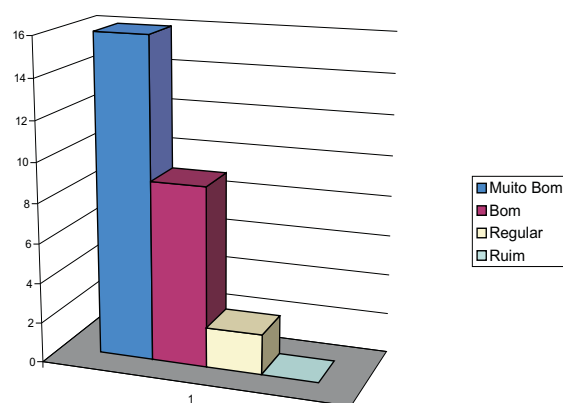


Figura 6.19: Independência do AutoCAD.

Finalmente, a Figura 6.20 mostra o gráfico da avaliação do sistema considerando os critérios funcionalidade, usabilidade e eficiência.

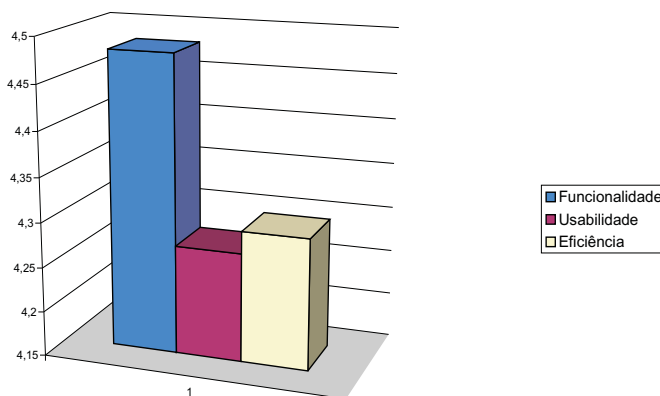


Figura 6.20: Critérios IsoNorm.

Analisando as respostas dos questionários, conclui-se que o sistema protótipo desenvolvido foi bem aceito pelos usuários entrevistados. Estes contribuíram com sugestões

que certamente serão contempladas em versões futuras.

6.4 Limitações e Melhoramentos

O *arqElectrical* é apenas um protótipo para demonstrar a flexibilidade das técnicas propostas para a construção de um sistema *CAD/CAE*. O grafo de restrições, mantido na memória do computador, armazena informações relativas ao desenho e a solução de projeto de engenharia. Esta seção apresenta algumas limitações observadas no sistema desenvolvido (a aplicação para projetos de instalações elétricas). Os melhoramentos serão as implementações que possibilitarão as correções destas limitações apresentadas a seguir:

- o arquivo da planta baixa contem apenas dados relativos às paredes, faltando dados de janelas, portas, telhados, móveis etc., que certamente facilitaria a visualização mais real de uma casa tridimensional;
- o ambiente 3D não é ainda um sistema de *RV*, faltando uma navegação, interação que possibilite a sensação de um ambiente real;
- o dimensionamento dos condutores é baseado em três critérios (*capacidade de corrente, queda de tensão e tabela mínima*) apesar de ser suficiente para a maioria das instalações elétricas residenciais, poderia levar em consideração outros critérios recomendados pela ABNT 5410;
- os obstáculos são identificados pelo sistema com o auxílio do usuário e limita-se a projetos estruturais. Poderia ser considerado qualquer obstáculo devido a outros projetos;
- o cálculo do menor caminho nem sempre é a melhor opção. Poderia atribuir pesos às trajetórias de eletrodutos a fim de considerar obstáculos, paredes que não podem passar tubulações etc. Além de analisar se um determinado caminho acomodaria melhor os condutores dentro dos eletrodutos, se permitiria facilidade para manutenção, etc.
- o cálculo luminotécnico baseia-se na norma *NBR 5410* em $\frac{W}{m^2}$ e no método *Lumens*, pode ser estendido para o método ponto-a-ponto.

6.5 Considerações finais

Este capítulo apresentou os resultados obtidos pelo sistema desenvolvido através do estudo de caso: projeto de instalação elétrica para uma residência. As principais vantagens do sistema proposto foram destacadas como sendo suas próprias características. O capítulo apresentou, também, as limitações observadas destacando que serão corrigidas em futuras versões. O próximo capítulo conclui este trabalho e apresenta sugestões para trabalhos futuros.

Capítulo 7

Conclusões e Trabalhos Futuros

7.1 Introdução

Esta tese descreveu um conjunto de técnicas de restrições para projetos de instalações elétrica, demonstrando a aplicabilidade destas através da implementação de um sistema protótipo. A abordagem considerada na implementação é a abordagem baseada na construção geométrica. Mais precisamente, baseada em grafos utilizando-se de técnicas de propagação local (incremental) para acomodar uma nova restrição ou para satisfazer as restrições existentes durante a manipulação do desenho por parte do projetista. O sistema automatiza diversas tarefas de projeto, como traçado de tubulações e cálculos de dimensionamento, a fim de facilitar a escolha do projetista diante de diversas alternativas visando melhorar o projeto, seja tecnicamente ou economicamente pois o sistema considera a opção de menor custo de material. O protótipo foi desenvolvido baseado na linguagem C# em um *Pentium 4, com clock de 1.7 GHz com 512 MB de RAM*. O sistema foi avaliado com o estudo de caso de um projeto residencial.

7.2 Conclusões

A principal contribuição desta tese é a comprovação da utilização dos algoritmos desenvolvidos a partir da extensão de algoritmos incrementais que suportam a satisfação de restrições geométricas para projetos de instalações elétricas. Este conjunto de algoritmos facilitou a resolução de diversos problemas detectados em ferramentas relacionadas com a que foi desenvolvida. Também foi apresentado um estudo comparativo de sistemas *CAD* tradicionais e sistemas baseado em restrições, além de um estudo técnico entre diversas ferramentas comerciais atualmente utilizadas em projetos de instalações elétricas. Este estudo foi o ponto de partida para a implementação de um sistema baseado em restrições para ser utilizado em projetos de instalações elétricas. O sistema desenvolvido, baseado em grafos, gerencia as restrições impostas e

mantém o grafo atualizado satisfazendo as restrições existentes durante a interação com o usuário. O projetista pode acompanhar o projeto sabendo as dimensões de condutores e eletrodutos quando for acrescentada ou retirada carga de um dado circuito. Algumas ferramentas atuais apresentam o somatório de potência ativa e aparente sem, entretanto, manter atualizada as seções dos condutores. O objetivo proposto de investigar algoritmos computacionais que suportem eficientemente projetos de instalações elétricas baseados em restrições foi alcançado através da satisfação das limitações identificadas. As soluções destas limitações são:

- O sistema reduz a dependência excessiva do engenheiro projetista à medida que automatiza a construção da malha de teto, a otimização dos menores caminhos para os circuitos elétricos formados e uma seqüência mais natural de projeto;
- A ferramenta é de fácil utilização providenciando uma maneira mais natural e didática de desenvolver um projeto de instalação elétrica;
- A possibilidade de uso do ambiente tridimensional como um ambiente virtual permitindo a navegação, interação e envolvimento das pessoas envolvidas no uso do sistema. A percepção detalhada do projeto contribui na redução do tempo de discernimento;
- Existe uma preocupação quanto a eficiência energética intrínseca ao sistema à medida que economiza material e minimiza perdas energéticas nos traçados de menores caminhos para os eletrodutos e na posição do quadro de distribuição no centro de cargas da instalação;
- Capacidade de providenciar soluções intermediárias do projeto geométrico. A tubulação das cargas é incrementalmente traçada à medida que se insere cargas de força (tomadas) no projeto com isto aumenta-se a flexibilidade do engenheiro de testar diferentes alternativas de projetos;
- Dimensionamento incremental da seção dos condutores mantendo o usuário informado de efeitos de dimensionamento com a variação de cargas em um circuito;
- Detecção automática de obstáculos em conflito com a malha de eletrodutos que também é lançada automaticamente no projeto;

- Capacidade de comunicar simultaneamente com dois ambientes diferentes de trabalho: a planta baixa em 2D e a casa “virtual” em 3D. Qualquer alteração em um dos ambientes é imediatamente refletida no outro.

De acordo com a avaliação feita com usuários da área, pode-se concluir que através das técnicas desenvolvidas o projetista tem um ganho de produtividade no desenvolvimento de seus projetos. Isto graças a natureza incremental do sistema desenvolvido. Diferente de outras técnicas apresentadas na literatura, as técnicas aqui propostas evitam satisfazer o conjunto inteiro de restrições devido à inserção de uma nova restrição. Além disso, o sistema proposto permite que as restrições sejam incrementalmente satisfeitas, através da exploração dos graus de liberdades das entidades geométricas de um projeto em desenvolvimento.

7.3 Trabalhos Futuros

Uma das metas desta tese foi mostrar um sistema que permita ao projetista o desenvolvimento de projetos baseado em técnicas de restrições geométricas de maneira interativa e intuitiva. A seguir, serão descritos alguns trabalhos futuros, visando o aprimoramento deste trabalho.

- **Realidade Virtual Imersiva**

O usuário dotado de dispositivos especiais como capacete, óculos e luvas navegará pela casa virtual para experimentar uma sensação mais realística da concretização do projeto.

- **Realidade Aumentada**

Um sistema de RA dotado de fontes de projeção e filmadoras capturam a cena de uma parede e projetam ao mesmo tempo sob a própria parede uma espécie de raio-x mostrando os eletrodutos que passam naquela parede.

- **Projetos de Instalações Elétricas Prediais**

A conexão de diversos grafos representando instalações elétricas individuais possibilitará a construção de projetos de instalações para edificações verticais.

- **Projetos de Instalações Telefônicas**

A representação, em um grafo de restrições, dos elementos de um projeto telefônico possibilitará a integração com o projeto elétrico.

- **Simulação de testes de dinâmica**

A representação da instalação elétrica em grafo permitirá ensaios simulando curto-circuito, sobretensão, subtensão etc. O sistema analisará os efeitos destes ensaios para o tempo de vida útil da instalação.

- **Gerenciamento de Instalações Elétricas**

Um projeto de instalação elétrica feito no *arqElectrical* pode ser utilizado para controle e gerenciamento de toda a instalação. Isto é, através de sensores colocados em diversos pontos de energia e em disjuntores da instalação, se estabelecerá uma comunicação em tempo real com uma placa de interface entre estes sensores e o computador. O computador com o software de gerenciamento e o projeto da instalação recebe os sinais da placa e disponibiliza-os novamente no projeto. Assim, o usuário (engenheiro ou cliente) poderá controlar as cargas da instalação, ligando-as ou desligando-as remotamente de acordo com os seus interesses.

Referências Bibliográficas

- [Abdennadher e Rigotti 2004]ABDENNADHER, S.; RIGOTTI, C. Automatic generation of rule-based constraint solvers over finite domains. *ACM Trans. Comput. Logic*, ACM Press, v. 5, n. 2, p. 177–205, 2004. ISSN 1529-3785.
- [ABNT 2004]ABNT, A. B. de N. T. *NBR 5410 - Instalações Elétricas de Baixa Tensão*. [S.l.], 2004.
- [Alexander e Sadiku 2003]ALEXANDER, C. K.; SADIKU, M. N. O. *Fundamentals of Electric Circuits*. New York: McGraw-Hill, 2003.
- [Allen et al. 2004]ALLEN, S. R. K. S. et al. *Professional C# Programando*. 2. ed.. ed. São Paulo - SP: Pearson Education do Brasil, 2004.
- [Altoqi 2004]ALTOQI. *Lumine - Software para Instalações Elétricas*. Disponível em: <<http://www.altoqi.com.br>>. Acesso: jun 2002, 2004.
- [Angel 2000]ANGEL, E. *Interactive computer graphics: a top-down approach with OpenGL*. [S.l.]: Addison Wesley, 2000.
- [Archer 2001]ARCHER, T. *Descobrendo C#*. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus Ltda., 2001.
- [Aukstakalnis e Blatner 1992]AUKSTAKALNIS, S.; BLATNER, D. Silicon mirage: the art and science of virtual reality. In: . Berkeley, CA: [s.n.], 1992.
- [Autoenge 2005]AUTOENGE. *Autopower 4.0 - Software para projetos elétricos*. 2005. Disponível em: <http://www.autoenge.com.br/software/sf_autopower.htm>. Acesso: 20 Out.
- [Azuma 1997]AZUMA, R. T. A survey of augmented reality. *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, n. 4, p. 355–385, 1997.

- [Azuma 2001]AZUMA, R. T. Recent advances in augmented reality. *IEEE Computer Graphics and Applications*, n. 6, p. 34–37, 2001.
- [Bhansali 1995]BHANSALI, S. A hybrid approach to software reuse. In: *Proceedings of the 1995 Symposium on Software reusability*. [S.l.]: ACM Press, 1995. p. 215–218. ISBN 0-89791-739-1.
- [Booch, Rumbaugh e Jacobson 2005]BOOCH, G.; RUMBAUGH, J.; JACOBSON, I. *The Unified Modeling Language User Guide*. [S.l.: s.n.], 2005.
- [Bosela 2003]BOSELA, T. R. *Electrical systems design*. New Jersey: Prentice Hall, 2003.
- [Brüderlin 1987]BRÜDERLIN, B. Constructing three-dimensional geometric objects defined by constraints. In: *SI3D '86: Proceedings of the 1986 workshop on Interactive 3D graphics*. New York, NY, USA: ACM Press, 1987. p. 111–129. ISBN 0-89791-228-4.
- [Brunkhart 1994]BRUNKHART, M. W. *Interactive Geometric Constraint Systems*. [S.l.], 1994.
- [Camara 2003]CAMARA, F. *Dominado o Visual Studio.Net com C#*. Florianópolis - SC: VisualBooks Editora, 2003.
- [Cardoso, Bissochi e Lamounier 2003]CARDOSO, A.; BISSOCHI, F.; LAMOUNIER, E. A. Utilizando técnicas de realidade virtual para o estudo da conversão de energia solar em energia elétrica. In: *Symposium on Virtual Reality - SVR03*. Ribeirão Preto, Brasil: [s.n.], 2003.
- [Cardoso, Faria e Lamounier 2002]CARDOSO, A.; FARIA, L.; LAMOUNIER, E. A. A system to evaluate wasted electric energy based on virtual reality techniques. In: *Fifth International Conference on Computer Graphics and Imaging*. Kaua'i, CA: [s.n.], 2002.
- [Carvalho e Figueiredo 1991]CARVALHO, P. C. P.; FIGUEIREDO, L. H. de. Introdução à geometria computacional. In: *18º Colóquio Brasileiro de Matemática*. IMPA, Brasil: [s.n.], 1991.
- [CEMIG 1998]CEMIG. *Fornecimento de Energia Elétrica Em Tensão Secundária - Rede de Distribuição Aérea, Edificações Individuais*. [S.l.], Nov 1998.

- [Choi et al. 2003]CHOI, K. K. et al. Parametric design sensitivity analysis of hight frequency structural - acoustic problems using energy finite element method. In: *Proceedings of DETC.03*. Illinois, United States: ASME 2003 Design Engineering Technical Conferences, 2003.
- [Corporation 2001]CORPORATION, M. *Microsfot C#:n Segredos da Linguagem*. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus, 2001.
- [Datta 2003]DATTA, R. S. Using computer algebra to find nash equilibria. In: *Proceedings of the 2003 international symposium on Symbolic and algebraic computation*. [S.l.]: ACM Press, 2003. p. 74–79. ISBN 1-58113-641-2.
- [Davis 2004]DAVIS, T. A. A column pre-ordering strategy for the unsymmetric-pattern multifrontal method. *ACM Trans. Math. Softw.*, ACM Press, v. 30, n. 2, p. 165–195, 2004. ISSN 0098-3500.
- [Deitel et al. 2003]DEITEL, H. M. et al. *C# Como Programar*. São Paulo - SP: Pearson Education do Brasil, 2003.
- [Dhooge, Govaerts e Kuznetsov 2003]DHOOGHE, A.; GOVAERTS, W.; KUZNETSOV, Y. A. Matcont: A matlab package for numerical bifurcation analysis of odes. *ACM Trans. Math. Softw.*, ACM Press, v. 29, n. 2, p. 141–164, 2003. ISSN 0098-3500.
- [Dohmen 1995]DOHMEN, M. A survey of constraint satisfaction techniques for geometric modeling. *Computers & Graphics*, n. 6, p. 831–845, 1995.
- [Edicy 2005]EDICY, M. *Conceitos e ferramentas para a integração de projetos e informações*. São Paulo: CADESIGN, 2005.
- [Fa, Fernando e Dew 1993]FA, M.; FERNANDO, T.; DEW, P. Interactive constraint-based solid modelling using allowable motion. In: *ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*. [S.l.: s.n.], 1993. p. 243–252.
- [Freeman-Benson, Maloney e Borning 1990]FREEMAN-BENSON, B. N.; MALONEY, J.; BORNING, A. An incremental constraint solver. *Commun. ACM*, ACM Press, v. 33, n. 1, p. 54–63, 1990. ISSN 0001-0782.

- [Freeman-Benson, Maloney e Borning 1990]FREEMAN-BENSON, B. N.; MALONEY, J.; BORNING, A. An incremental constraint solver. *Commun. ACM*, ACM Press, New York, NY, USA, v. 33, n. 1, p. 54–63, 1990. ISSN 0001-0782.
- [Frosch 2005]FROSCH, R. *Pesquisa mostra perfil dos usuários de CAD no mercado brasileiro*. São Paulo: CADESIGN, 2005.
- [Galuppo, Matheus e Santos 2004]GALUPPO, F.; MATHEUS, V.; SANTOS, W. *Desenvolvendo com C#*. Porto Alegre - RS: Bookman Companhia Editora, 2004.
- [Gomes e Velho 1998]GOMES, J.; VELHO, L. *Computação Gráfica*. [S.l.]: IMPA, 1998.
- [Gomes e Velho 2001]GOMES, J.; VELHO, L. *Sistemas Gráficos 3D*. [S.l.]: IMPA, 2001.
- [Goodrich e Tamassia 2004]GOODRICH, M. T.; TAMASSIA, R. *Projeto de algoritmos*. [S.l.: s.n.], 2004.
- [Granvilliers, Monfroy e Benhamou 2001]GRANVILLIERS, L.; MONFROY, E.; BENHAMOU, F. Symbolic-interval cooperation in constraint programming. In: *Proceedings of the 2001 international symposium on Symbolic and algebraic computation*. [S.l.]: ACM Press, 2001. p. 150–166. ISBN 1-58113-417-7.
- [Guibas e Russel 2004]GUIBAS, L.; RUSSEL, D. An empirical comparison of techniques for updating delaunay triangulations. In: *Proceedings of the twentieth annual symposium on Computational geometry*. [S.l.]: ACM Press, 2004. p. 170–179. ISBN 1-58113-885-7.
- [Hayt e Kemmerly 1975]HAYT, W. H.; KEMMERLY, J. E. *Análise de Circuitos em Engenharia*. [S.l.]: Mc Graw Hill, 1975.
- [Hétroy e Attali 2003]HÉTROY, F.; ATTALI, D. Topological quadrangulation of closed triangulated surfaces using the reeb graph. *Graphical Models*, p. 131–148, 2003.
- [Hickson 2005]HICKSON, R. *Aprenda a Programar em C, C++ e C#*. 2. ed.. ed. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus, 2005.
- [Hillyard e Braid 1978]HILLYARD, R. C.; BRAID, I. C. Characterizing non-ideal shapes in terms of dimensions and tolerances. In: *SIGGRAPH '78: Proceedings of the*

5th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. New York, NY, USA: ACM Press, 1978. p. 234–238.

[Hoffman, Gao e Yang 2004]HOFFMAN, C. M.; GAO, X.; YANG, W. Solving spatial basic geometric constraint configurations with locus intersection. *Computer-Aided Design*, p. 111–122, 2004.

[Hsu et al. 1997]HSU, C. et al. A constraint-based manipulator toolset for editing 3d objects. In: *SMA '97: Proceedings of the fourth ACM symposium on Solid modeling and applications*. New York, NY, USA: ACM Press, 1997. p. 168–180. ISBN 0-89791-946-7.

[IEEE-STD-830 1998]IEEE-STD-830. Recommended practice for software requirements specifications. *IEEE*, IEEE, New York, NY, 1998.

[Joan-Arinyo, Soto e Vila 2003]JOAN-ARINYO, R.; SOTO, A.; VILA, S. Resolución de restricciones geométricas. *Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial*, n. 20, p. 121–136, Oct 2003.

[Joan-Arinyo et al. 2002]JOAN-ARINYO, R. et al. Revisiting decomposition analysis of geometric constraint graphs. In: *Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications*. [S.l.]: ACM Press, 2002. p. 105–115. ISBN 1-58113-506-8.

[Joan-Arinyo et al. 2002]JOAN-ARINYO, R. et al. Revisiting decomposition analysis of geometric constraint graphs. In: *SMA '02: Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications*. New York, NY, USA: ACM Press, 2002. p. 105–115. ISBN 1-58113-506-8.

[Joan-Arinyo et al. 2003]JOAN-ARINYO, R. et al. Transforming an under-constrained geometric constraint problem into a well-constrained one. In: *Proceedings of the eighth ACM symposium on Solid modeling and applications*. [S.l.]: ACM Press, 2003. p. 33–44. ISBN 1-58113-706-0.

[Joan-Arinyo e Soto-Riera 1999]JOAN-ARINYO, R.; SOTO-RIERA, A. Combining constructive and equational geometric constraint-solving techniques. *ACM Trans. Graph.*, ACM Press, New York, NY, USA, v. 18, n. 1, p. 35–55, 1999. ISSN 0730-0301.

- [Kamel, Enright e Ma 1993]KAMEL, M. S.; ENRIGHT, W. H.; MA, K. S. Odexpert: an expert system to select numerical solvers for initial value ode systems. *ACM Trans. Math. Softw.*, ACM Press, v. 19, n. 1, p. 44–62, 1993. ISSN 0098-3500.
- [Knuth 1993]KNUTH, D. E. *The Stanford GraphBase: A Platform for Combinatorial Computing*. [S.l.]: ACM Press, 1993.
- [Kramer 1991]KRAMER, G. A. Using degrees of freedom analysis to solve geometric constraint systems. In: *Proceedings of the first ACM symposium on Solid modeling foundations and CAD/CAM applications*. [S.l.]: ACM Press, 1991. p. 371–378. ISBN 0-89791-427-9.
- [Kramer 1994]KRAMER, G. A. A geometric constraint engine. In: . [S.l.]: MIT Press, 1994. p. 327–360. ISBN 0-262-56075-5.
- [Kurose e Ross 2003]KUROSE, J. F.; ROSS, K. W. *Computer Networking: A Top-Down Approach Featuring the Internet*. [S.l.]: Addison Wesley, 2003.
- [Kwaiter, Gaildrat e Caubet 1997]KWAITER, G.; GAILDRAT, V.; CAUBET, R. Interactive constraint system for solid modeling objects. In: *Proceedings of the fourth ACM symposium on Solid modeling and applications*. [S.l.]: ACM Press, 1997. p. 265–270. ISBN 0-89791-946-7.
- [Lamounier 1996]LAMOUNIER, E. *An Incremental Constraint-Based Approach to Support Engineering Design*. Tese (Doutorado) — School of Computer Studies, University of Leeds, 1996.
- [Latta e Oberg 1994]LATTA, J. N.; OBERG, D. J. A conceptual virtual reality model. *Computers Graphics & Applications*, p. 23–29, 1994.
- [Leeuwen 1999]LEEUWEN, J. P. *Modelling Architectural Design Information by Features*. Tese (Doutorado) — Eindhoven University of Technology, 1999.
- [Liberty 2006]LIBERTY, J. *Programando C#*. 4. ed.. ed. Rio de Janeiro - RJ: Editora Alta Books, 2006.
- [Light e Gossard 1982]LIGHT, R.; GOSSARD, D. C. Modification of geometric models through variational geometry. *Computer-Aided Design*, v. 14, n. 4, p. 209–214, 1982.

- [Lima e Reis 2002]LIMA, E.; REIS, E. *C# e .Net Guia do Desenvolvedor*. Rio de Janeiro - RJ: Editora Campus, 2002.
- [Linsley 2001]LINSLEY, T. *Basic Electrical Installation Work*. [S.l.]: Elsevier, 2001.
- [Meiguins et al. 2005]MEIGUINS, B. S. et al. Construção de projetos arquitetônicos com realidade aumentada. In: *II Workshop de Realidade Aumentada*. Piracicaba, São Paulo: [s.n.], 2005.
- [Moreira 2003]MOREIRA. *Software for structure, hydraulics and electric*. São Paulo: CADESIGN, 2003.
- [Multiplus 2005]MULTIPLUS. *PRO-Elétrica*. Disponível em: <<http://www.multiplus.com>>. Acesso: 20 out 2005: [s.n.], 2005.
- [Owen 1991]OWEN, J. C. Algebraic solution for geometry from dimensional constraints. In: *SMA '91: Proceedings of the first ACM symposium on Solid modeling foundations and CAD/CAM applications*. New York, NY, USA: ACM Press, 1991. p. 397–407. ISBN 0-89791-427-9.
- [Procobre 2006]PROCOBRE. *Instituto Brasileiro do Cobre*. 2006. Disponível em: <<http://www.procobre.org/br>>. Acesso: 17 Abr 2006.
- [Robert, Nuria e Anton 2001]ROBERT, J.; NURIA, M.; ANTON, S. A constraint solving-based approach to analyze 2d geometric problems with interval parameters. In: *Proceedings of the Sixth ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*. Michigan, United States: [s.n.], 2001.
- [Rosenberg 2004]ROSENBERG, P. *Audel Guide to the 2002 National Electrical Code*. [S.l.]: Wiley Publishing, 2004.
- [Rossignac 1986]ROSSIGNAC, J. R. Constraints in constructive solid geometry. In: *Proceedings of the 1986 Workshop on Interactive 3D Graphics*. [S.l.: s.n.], 1986. p. 93–110. ISBN 1-58113-506-8.
- [Sakurai e Gossard 1983]SAKURAI, H.; GOSSARD, D. C. Solid model input through orthographic views. In: *SIGGRAPH '83: Proceedings of the 10th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*. New York, NY, USA: ACM Press, 1983. p. 243–252. ISBN 0-89791-109-1.

- [Sannella 1994]SANNELLA, M. Skyblue: a multi-way local propagation constraint solver for user interface construction. In: *UIST '94: Proceedings of the 7th annual ACM symposium on User interface software and technology*. New York, NY, USA: ACM Press, 1994. p. 137–146. ISBN 0-89791-657-3.
- [Serrano 1991]SERRANO, D. Automatic dimensioning in design for manufacturing. In: *Proceedings of the first ACM symposium on Solid modeling foundations and CAD/CAM applications*. [S.l.]: ACM Press, 1991. p. 379–386. ISBN 0-89791-427-9.
- [Silva et al. 2005]SILVA, A. L. et al. Uma ferramenta cad para apoio a projetos de instalações elétricas. In: *Congresso Brasileiro de Eficiência Energética*. Belo Horizonte, Brasil: [s.n.], 2005.
- [Silva e Lamounier 2002]SILVA, A. L.; LAMOUNIER, E. An incremental algorithm to support geometric constraint satisfaction in engineering design. In: *6-th International Conference on Information Visualization (IV'02)*. London, England: [s.n.], 2002.
- [Souza e Moreno 2002]SOUZA, J. R.; MORENO, H. Guia em da nbr-5410 instalações elétricas de baixa tensão. Arande Editora, 2002.
- [Turtschi, Werry e Hack 2004]TURTSCHI, A.; WERRY, J.; HACK, J. A. G. Rio de Janeiro - RJ: Editora Alta Books Ltda, 2004.
- [VipTec 2005]VIPTEC. *CAD/Elet - Software para projetos elétricos*. 2005. Disponível em: <<http://www.viptec.com.br>>. Acesso: 20 Out.
- [Vries, Jessurun e Kelleners 2000]VRIES, B. de; JESSURUN, A. J.; KELLENNERS, R. H. M. C. Using 3d geometric constraints in architectural design support systems. In: *8-Th International Conference in Central Europa on Computer Graphics*. University of West Bohemia, Czech Republic: [s.n.], 2000.
- [Watson et al. 2002]WATSON, K. et al. *Beginning C# Programando*. São Paulo - SP: Pearson Education do Brasil, 2002.
- [Wille 2001]WILLE, C. *Apresentando C#*. São Paulo - SP: Editora Berkeley, 2001.
- [Yu e Kumar 2000]YU, L.; KUMAR, A. V. *Constraint imposition and updating algorithms in dimension-driven solid modeling*. 147 p. Tese (Doutorado) — University of Florida, 2000.

- [Zanden 1992]ZANDEN, B. T. V. *A Domain-Independent Algorithm for Incrementally Satisfying Multi-Way Constraints*. University of Tennessee, 1992.
- [Zanden 1996]ZANDEN, B. V. An incremental algorithm for satisfying hierarchies of multiway dataflow constraints. *ACM Transactions on Programming Languages and Systems*, n. 1, p. 30–72, Jan 1996.

Apêndices A

Projeto de Instalações Elétricas

Este apêndice discute as etapas que deve ser consideradas na elaboração de um projeto de instalação elétrica residencial. Todo o projeto deve ser norteado por Normas técnicas locais (concessionária de energia), nacionais (NBR 5410 da ABNT) e internacionais (National Electrical Code - NEC) com o objetivo de dimensionar corretamente os materiais a serem utilizados na instalação.

Entretanto, seguir as normas não garante um ótimo projeto, depende, ainda, da capacidade criativa do projetista, do contexto envolvido e de discernimento para comparar possíveis soluções [Bosela 2003, Souza e Moreno 2002]. Nesse sentido devem considerar:

A.1 O Planejamento da Instalação

O engenheiro projetista planeja uma instalação elétrica de uma residência interagindo dinamicamente com o cliente e com os institutos técnicos normatizadores.

A interação com o cliente, com auxílio de uma planta arquitetônica como por exemplo a mostrada na Figura A.1, permite o levantamento das cargas elétricas visando segurança, conforto e confiabilidade.

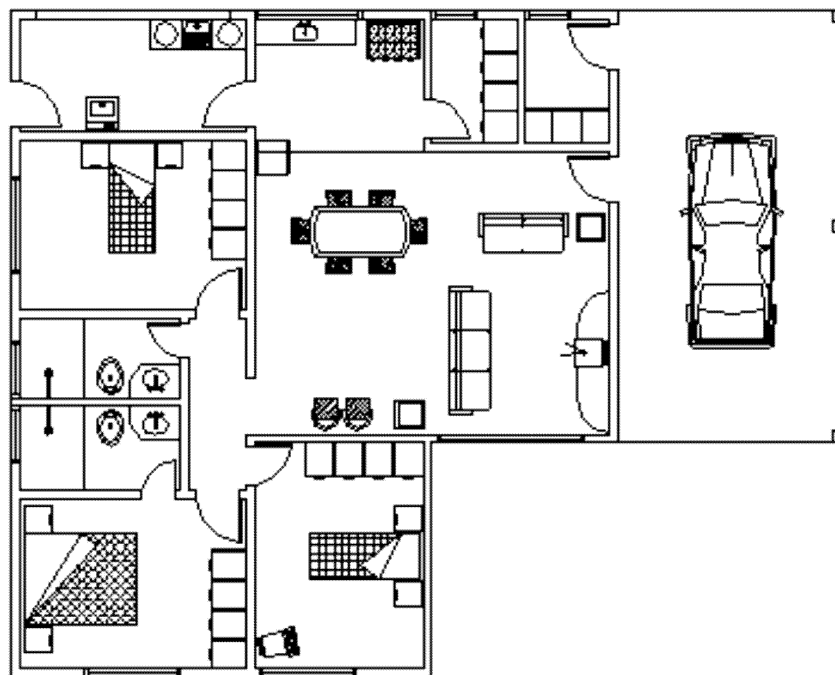


Figura A.1: Planta arquitetônica auxilia na determinação dos pontos elétricos.

Geralmente, nesta etapa faz-se uso de alguma ferramenta *CAD* para acelerar o processo a fim de:

- Montar tabela de iluminação;
- Montar tabela de tomadas;
- Levantar carga instalada e calcular a demanda para verificar o tipo de fornecimento por parte da concessionária;
- Calcular o ramal de entrada;
- Definir detalhe do padrão;
- Montar detalhe do quadro de distribuição;
- Formar a malha de teto com caixas octagonais e eletrodutos;
- Posicionar tomadas na parede;
- Interligar os eletrodutos em paredes e piso;
- Posicionar interruptores conforme o tipo;

A.1.1 Dimensionamento de Condutores, Eletrodutos e Disjuntores

A interação com os órgãos reguladores e/ou normatizadores visa padronizar o projeto dentro os limites aceitos pelos órgãos nacionais [?] e internacionais [Rosenberg 2004]. Dimensionar um circuito é definir a seção mínima dos condutores [Procobre 2006], de forma a garantir que os mesmos suportem satisfatoriamente e simultaneamente as condições de:

- 1.Limite de Temperatura, determinado pela Capacidade de Condução de Corrente;
- 2.Limite de queda de tensão;
- 3.Capacidade dos Dispositivos de Proteção contra Sobrecargas;
- 4.Capacidade de Condução da Corrente de Curto-Circuito por tempo limitado.

A Figura A.2 mostra partes de um projeto de instalações elétricas, evidenciando o circuito 1 contendo cargas de iluminação (1, 2 e 3) e o circuito 2 com tomadas para conectar possíveis aparelhos eletrodomésticos, por exemplo os aparelhos a e b. Os símbolos utilizados neste projeto são apresentados na Tabela A.1.

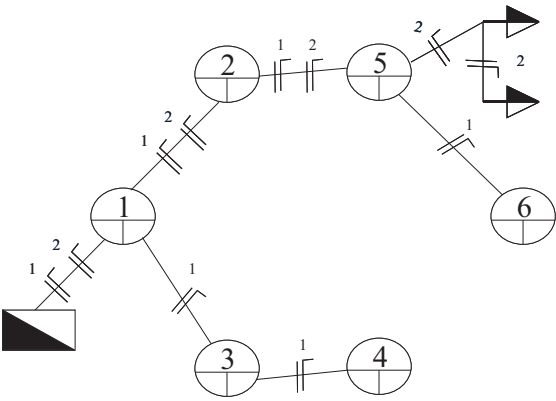


Figura A.2: Uma instalação elétrica típica.

Tabela A.1: Tabela de Símbolos Elétricos.

Símbolo	Descrição
○	Caixa Octagonal ou lâmpada no teto
▤	Quadro de Distribuição - QD -
➡	Tomada
	Condutor fase
⌈	Condutor Neutro conductor

Destacando o circuito 2 com as cargas devido aos eletrodomésticos, onde é novamente mostrado na Figura A.3 para análise e modelamento usando teorias de circuitos elétricos.

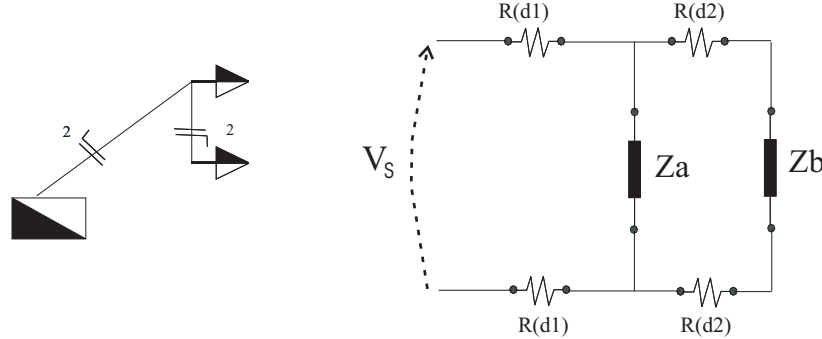


Figura A.3: Um circuito da instalação modelado com componentes de circuitos elétricos.

Este circuito é formado por uma fonte de tensão V_s localizada no quadro de distribuição QD e duas cargas Z_a e Z_b com ângulos de fator de potência ϕ_1 e ϕ_2 , potências aparente N_1 e N_2 , respectivamente. As cargas estão localizadas a uma certa distância d do QD. Para verificar a extensão do grafo de restrições aplicado à instalação elétrica, será demonstrado o dimensionamento dos condutores de uma instalação segundo os critérios queda de tensão e capacidade de corrente explicados no apêndice A.

Queda de Tensão

Aplicando o teorema da superposição, conforme [Linsley 2001], para o cálculo da queda de tensão nos condutores devido a cada carga separadamente. Ainda de acordo com o autor, para maioria dos circuitos de instalações elétricas residenciais, a reatância dos condutores é desprezível, considerando um fator de potência próximo a unidade.

Para o circuito 2 tem-se a queda de tensão ∇V como a soma das quedas de tensão nos condutores devido a cada carga considerada separadamente (Teorema da Superposição).

A queda de tensão ∇V_1 devido a carga 1, vide diagrama fasorial da Figura A.4, é dada por:

$$\nabla V_1 = 2 * I * R_1 * \cos\phi_1$$

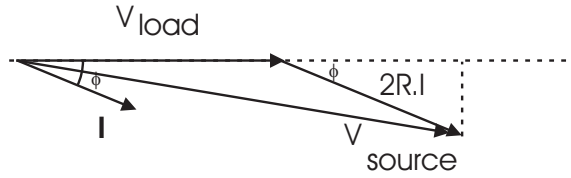


Figura A.4: Diagrama Fasorial do Circuito da Figura A.3.

Analogamente, ∇V_2 é dada por:

$$\nabla V_2 = 2 * I * (R_1 + R_2) * \cos\phi_2$$

Substituindo cada resistência por:

$$R = \frac{\rho}{S} \cdot d$$

Onde:

ρ = resistividade do material;

d = comprimento do condutor da carga ao quadro de distribuição;

S = Área da seção transversal.

Tem-se,

$$\nabla V_1 = 2 * I * \frac{\rho}{S} * d_1 * \cos\phi_1$$

$$\nabla V_1 = 2 * \frac{N_1}{V} * \frac{\rho}{S} * d_1 * \cos\phi_1$$

$$\nabla V_1 = \frac{2 * \rho}{V * S} * N_1 \cdot d_1 \cdot \cos\phi_1$$

Analogamente,

$$\nabla V_2 = \frac{2 * \rho}{V * S} * N_2 \cdot (d_1 + d_2) \cdot \cos\phi_2$$

Sabendo-se que a queda de tensão em circuitos de instalações elétrica residenciais tem um valor percentual máximo definido por normas [Rosenberg 2004] e [?]. Portanto, fixando o valor de ∇V , a seção S do condutor é calculada pela equação A.1.

$$S = \frac{2 * \rho}{V \cdot \nabla V} \sum_{i=1}^2 * (N \cdot d \cdot \cos\phi)_i \quad (\text{A.1})$$

O cálculo da seção S dos condutores é facilmente determinado em função das cargas interligadas por estes condutores. Cada carga contribui com a potência aparente, o

fator de potência e a distância desta ao quadro de distribuição de circuitos.

Generalizando para n cargas, tem-se:

$$S = \frac{2 * \rho}{V \cdot \nabla V} * \sum_{i=1}^n (N \cdot d \cdot \cos \phi)_i \quad (\text{A.2})$$

Capacidade de Corrente

A corrente de cada circuito é obtida diretamente pela expressão A.3, se o circuito for monofásico ou pela expressão A.4, se o circuito for trifásico.

$$I_B = \frac{1}{V} \sum \frac{N_i}{\cos \phi_i} \quad (\text{A.3})$$

$$I_B = \frac{1}{V} \sum \frac{N_i}{\sqrt{3} \cdot \cos \phi_i} \quad (\text{A.4})$$

Esta corrente é em seguida corrigida, equação A.5, para suportar os efeitos térmicos e os efeitos de agrupamento de condutores.

$$I'_B = \frac{I_B}{f_{ct} \cdot f_{ca}} \quad (\text{A.5})$$

O fator de correção de temperatura f_{ct} leva em consideração a variação da temperatura do condutor em relação à temperatura ambiente e é encontrado em tabelas fornecidas por fabricantes ou calculada diretamente pela equação A.6.

$$f_{ct} = \sqrt{\frac{T_Z - T_A}{T_Z - 30}} \quad (\text{A.6})$$

Onde:

f_{ct} : fator de correção de temperatura;

T_Z : Máxima temperatura de operação em regime contínuo - °C;

T_A : Temperatura Ambiente a ser considerada - °C.

O fator de correção de agrupamento f_{ca} leva em consideração a proximidade de outros condutores e é encontrado em tabelas fornecidas por fabricantes. A tabela A.2 mostra os valores de f_{ca} para eletrodutos ou calhas, enquanto a tabela A.3 mostra os valores para cabos dispostos em uma camada única em parede ou piso.

Tabela A.2: Fatores de correção para agrupamento de condutores

Cabos agrupados sobre uma superfície, eletroduto ou calha											
Número de Circuitos ou Cabos Multipolares											
1	2	3	4	5	6	8	9	10	12	14	16 \geq
1,00	0,80	0,70	0,65	0,60	0,55	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45	0,45

Tabela A.3: Disposição dos cabos em camada única em parede ou piso

Número de Circuitos ou Cabos Multipolares										
	1	2	3	4	5	6	10	12	14	16 \geq
Contíguos	1,00	0,85	0,80	0,75	0,75	0,70	0,70	0,70	0,70	0,65
Espaçados	1,00	0,95	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90	0,90

Assim fica determinada a corrente corrigida de projeto e a seção do condutor é novamente determinada pelas tabelas de fabricantes.

Tabela mínima

A tabela A.4 apresenta as seções mínima dos condutores isolados conforme a utilização em circuitos de instalações elétrica.

Tabela A.4: Tabela de seção Mínima dos Condutores

Tipo de Instalação	Utilização do Circuito	Seção (mm ²)
Instalações fixas em geral	Circuito de Iluminação	1,5
	Circuito de Força	2,5
	Circuito de sinalização	0,5
Ligações flexíveis	Equipamento específico	especificado pelo fabricante
	Qualquer outra aplicação	0,75
	Circuito extra-baixa tensão	0,75

Proteção dos circuitos

Para dimensionar os dispositivos de proteção dos condutores de cada circuito contra sobrecorrente, o engenheiro utiliza-se de fusíveis e de disjuntores. Os disjuntores não necessitam ser substituídos quando atuam, e sim apenas de um religamento, como se fosse um interruptor. Se o defeito na rede continuar, o disjuntor desarmará novamente e, neste caso, não deverá ser rearmado antes de pesquisar a causa do defeito.

A “grosso modo”, a corrente nominal do disjuntor deve ser 25% da corrente máxima do circuito a ser protegido.

A.1.2 Atualização do Projeto

Marcar no projeto os detalhes de fiação e dimensionamento de condutores e eletrodutos e ainda, inserir no desenho o diagrama unifilar e a tabela resumo da instalação.

A.2 Exemplo

Esta seção apresenta cálculos, tabelas para um projeto de instalação elétrica considerando a planta arquitetônica da Figura A.1.

A.2.1 Iluminação

Na definição da iluminação, foi utilizada a regra [CEMIG 1998] conhecida como W/m^2 , ou seja, se $S = 6m^2$ adota-se $P = 100W$, se $S > 6m^2$ tem-se 100W para os primeiros $6m^2$ e mais 60W para cada fração inteira de $4m^2$ da área restante.

Partindo deste princípio, da área de cada ambiente e das lâmpadas disponíveis comercialmente foi montada a tabela de iluminação A.5.

Tabela A.5: Tabela de Iluminação

Local	Área (m^2)	Cálculo (VA)	Pot. Utilizada (VA)	Total (VA)
Quarto-1	12	160	2x60	120
Quarto-2	12	160	2x60	120
Quarto-3	12	160	2x60	120
Corredor	3,05	100	1x60	60
WC-1	3,99	100	1x100	100
WC-2	4,275	100	1x100	100
Cozinha	7,05	100	1x100	100

Tabela A.5: Tabela de Iluminação (continuação)

Local	Área (m^2)	Cálculo (VA)	Utilizado (VA)	Potência (VA)
AS	8	100	1x100	100
Sala	31,5	460	4x100	400
Dispensa	3,3	100	1x100	100
Despejo	3,3	100	1x100	100
Garagem			2x60	120
Exterior			6x60	360
Total				1.900

A.2.2 Tomadas

Inicialmente é calculado, segundo as normas, a quantidade mínima de tomadas devido o perímetro de cada cômodo. O cliente/projetista especifica os aparelhos e suas respectivas potências para cada cômodo devendo o número de tomadas ser maior ou igual ao valor mínimo calculado. A tabela A.6 apresenta para cada cômodo o número mínimo de tomadas, a descrição dos aparelhos efetivamente projetados com sua respectiva potência e a potência total por cômodo.

Tabela A.6: Tabela de Tomadas

Local	Nº Mínimo	Aparelhos	Potência (VA)	Total (VA)
Quarto-1	3	T.U.G.	100	210
		Abajur	60	
		Rádio Relógio	50	
Quarto-2	3	T.U.G.	100	2.460
		Microcomputador	350	
		Abajur	60	
		Ar-Condicionado	1.900	
		Rádio	50	
Quarto-3	3	T.U.G.	100	210
		Abajur	60	
		Rádio Relógio	50	
Corredor	1	T.U.G.	100	100

Tabela A.6: Tabela de Tomadas (continuação)

Local	Nº Mínimo	Aparelhos	Potência (VA)	Total (VA)
WC-1	1	T.U.G.	600	6.600
		Chuveiro	6.000	
WC-2	1	T.U.G.	600	6.600
		Chuveiro	6.000	
Cozinha	3	T.U.G.	100	3.050
		Geladeira	250	
		Máquina de Lavar Louças	1.500	
		Batedeira	100	
		Liquidificador	100	
		Microondas	750	
		Fogão	150	
		Exaustor	150	
AS	4	T.U.G.	100	2.200
		Ferro de Passar	1.000	
		Máquina de Lavar Roupas	1.000	
		Ventilador	100	
Sala		T.U.G.	100	800
		TV	300	
		Vídeo	200	
		Asparelho de som	200	
Garagem		T.U.G.	1000	1.000
Dispensa		T.U.G.	100	100
Despejo		T.U.G.	100	100
Total				23.480

A.2.3 Tipo de Fornecimento

A carga instalada de 25.380 (1.900 + 23.480) indica, com base na norma da concessionária (por exemplo a ND 5.1 da CEMIG), que o tipo de fornecimento é:

Tipo D: fornecimento de energia a 4 fios (3 condutores fases - neutro) - abrange as unidades consumidoras urbanas, a serem atendidas por redes secundárias trifásicas

(127/220V), com carga instalada de até 75kW.

Como a carga instalada é superior a 15 KW, o dimensionamento da entrada de serviço deve ser feita pela demanda provável da edificação.

Demanda

Numa instalação elétrica é pouco provável que todos os aparelhos estejam ligados ao mesmo tempo.

A expressão para o cálculo da demanda, de acordo com as normas vigentes, é:

$$D = a + b + c + d + e + f(kVA)$$

Onde:

a =demanda referente à iluminação (kVA);

b =demanda relativa ao aparelhos eletrodomésticos e de aquecimento:

b1 =chuveiros, torneiras e cafeteiras elétricas;

b2 =aquecedores de água por acumulação e por passagem;

b3 =fornos, fogões e aparelhos tipo “Grill”;

b4 =máquinas de lavar e secar roupas, máquinas de lavar louças e ferro elétrico;

b5 =demais aparelhos (TV, som, ventilador, geladeira, freezer, torradeira, liquidificador, batedeira, exaustor, ebulidor, etc.)

c =demanda dos aparelhos condicionadores de ar condicionado:

100%para os 05 primeiros aparelhos;

86%para os demais.

d =demanda relativa a motores elétricos;

e =demanda relativa a máquinas de solda e transformadores;

f =demanda relativa a aparelhos de raio-X.

Consultando as tabelas da ND 5.1 e fazendo os cálculos determina-se D.

$$D = 20.080,6$$

Com o valor da demanda calculada e através de novas consulta às tabelas de dimensionamento para unidades consumidoras (ND 5.1 a partir da página 7-2) a instalação é melhor caracterizada:

Faixa:D3 - demanda de 23,1 até 27,0 kVA

Fios:4

Fases:3

Proteção:disjuntor termo-magnético de 70A.

Ramal de entrada embutido:

Condutor de cobre PVC - 70°C:23mm²

OBS.: O condutor neutro do ramal de entrada deve ter a mesma seção dos condutores fase.

Eletrotudo (PVC):ϕ 40mm

Aterramento:

Condutor de aço:ϕ 6,4mm (1/4”).

OBS.: Alternativamente ao cabo de aço zincado, 7 fios, ϕ 6,4mm (1/4”), pode ser utilizado condutor de cobre 10mm², protegido por eletroduto de aço ϕ 15mm o de PVC ϕ 20mm.

Quantidade de eletrodos:2.

Poste de aço do mesmo lado da rede PA1 ou do lado oposto PA4;

Pontalete de aço tipo PT1.

A.2.4 Formação dos circuitos

Na formação dos circuitos, tabela A.7, foi considerado a proximidade das cargas e o limite de 2.200W de potência, exceção aos circuitos específicos como chuveiro, ar condicionado etc. Procurou-se obter um “menor caminho” para que os condutores circuitos não ficassem muito longos evitando perdas de energia.

Tabela A.7: Divisão dos Circuitos

Nº Circuito	Descrição do Circuito	Potência (W)
1	Chuveiro WC-1	6.000
2	Chuveiro WC-2	6.000
3	Iluminação	1.900
4	Ar Condicionado	1.900
5	Lava Louças	1.500
6	Tomadas: Q1, Q2, Q3, Sala Estar e Dispensa	1.880
7	Tomadas: Cozinha, Corredor e Despejo	1.800
8	Tomadas: AS	2.200
9	Tomadas: Garagem e WC (T.U.G.)	2.200
Total		25.380

A.2.5 Dimensionamento dos condutores

No dimensionamento dos condutores foram utilizados os critérios *queda de tensão* (tabela A.8), *capacidade de condução* (tabela A.9) e a *tabela mínima*, prevalecendo a maior seção.

Os parâmetros considerados no dimensionamento *Queda de Tensão* foram: tensão de 220 V, queda percentual de tensão de 2% e a soma dos produtos potência x distância de cada carga do circuito.

Tabela A.8: Dimensionamento Queda de Tensão

Nº Circuito	P.d	S (mm ²)
1	31.800	1,50
2	33.000	1,50
3	36.222	1,50
4	83.700	4,50
5	19.800	1,50
6	37.523	1,50
7	32.920	1,50
8	24.920	1,50

Tabela A.8: Dimensionamento Queda de Tensão (continuação)

<i>Nº</i> Circuito	<i>P.d</i>	S (mm ²)
9	31.580	1,50

N dimensionamento *Capacidade de Condução de Corrente* calculou-se a corrente de cada circuito e em seguida fez as correções necessárias.

Tabela A.9: Dimensionamento Capacidade de Corrente

<i>Nº</i> Circuito	<i>I_{corrigida}</i> (A)	S (mm ²)
1	48,65	6
2	48,65	6
3	15,41	1
4	15,41	1
5	12,16	1
6	15,24	1
7	14,60	1
8	17,84	1
9	17,84	1

A tabela A.10 mostra as seções dos condutores em cada critério evidenciando a determinação da seção final.

Tabela A.10: Determinação da seção S do condutor em (mm²)

<i>Nº</i> Circuito	<i>Queda de tensão</i>	<i>Corrente</i>	<i>Mínima</i>	<i>S</i>
1	1,50	6,0	2,5	6,0
2	1,5	6,0	2,5	6,0
3	1,5	1,0	1,5	1,5
4	4,0	1,0	2,5	4,0
5	1,5	1,0	2,5	2,5

Tabela A.10: Determinação da seção S do condutor em (mm^2) (continuação)

N° Circuito	<i>Queda de tensão</i>	<i>Corrente</i>	<i>Mínima</i>	S
6	1,5	1,0	2,5	2,5
7	1,5	1,0	2,5	2,5
8	1,5	1,0	2,5	2,5
9	1,5	1,0	2,5	2,5

Como o fornecimento é trifásico procura-se distribuir os circuitos de maneira equilibrada nas três fases. O balanceamento das fases é mostrado na tabela A.11.

Tabela A.11: Balanceamento de fases

N° Circuito	AB	BC	CA
1	6.000		
2		6.000	
3			1.900
4			1.900
5			1.500
6			1.880
7			1.800
8		2.200	
9	2.200		
Total/fase	8.200	8.200	8.980

A.2.6 Dimensionamento dos eletrodutos

Através da utilização da tabela de agrupamento de condutores dentro de eletrodutos e interpolação destes dados é dimensionada a seção do eletroduto.

O diâmetro obtido dos eletrodutos mais sobrecarregados foi de 25 mm, enquanto os demais foi de 20 mm.

A.2.7 Dimensionamento dos disjuntores

Determina-se a corrente em cada circuito, corrigindo-a em 25% e adotando o valor comercial maior mais próximo (tabela A.12).

Tabela A.12: Dimensionamento dos disjuntores

N° Circuito	I_B	$I_{Disjuntor}$
1	27,27	35
2	27,27	35
3	8,64	15
4	8,64	15
5	6,82	10
6	8,55	15
7	8,18	15
8	17,84	25
9	10,00	15

Detalhe do Quadro de Distribuição

A Figura A.5 mostra o quadro de distribuição evidenciando os circuitos ligados nas fases da alimentação e os eletrodutos de entrada e saída do quadro.

Diagrama Unifilar

A Figura A.6 mostra o diagrama unifilar da instalação projetada.

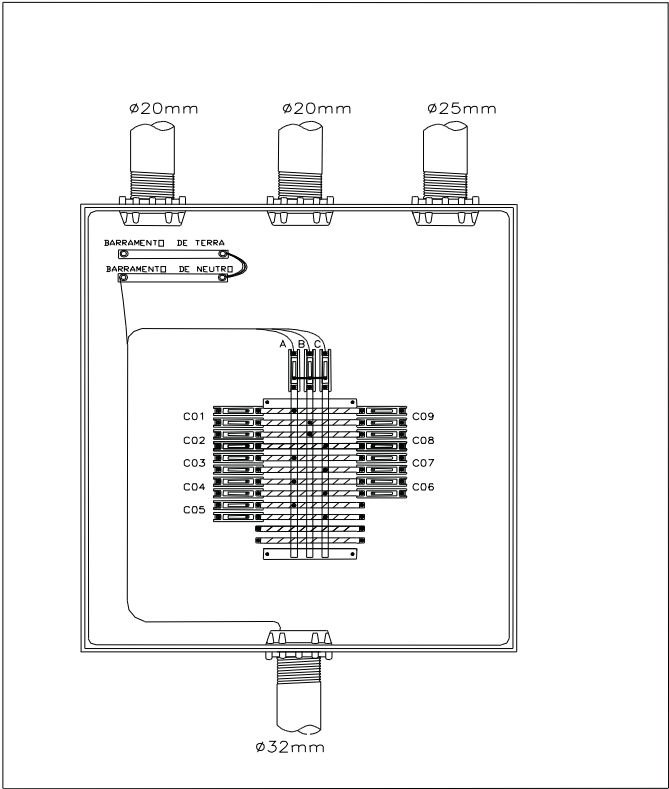


Figura A.5: Detalhe do quadro de distribuição.

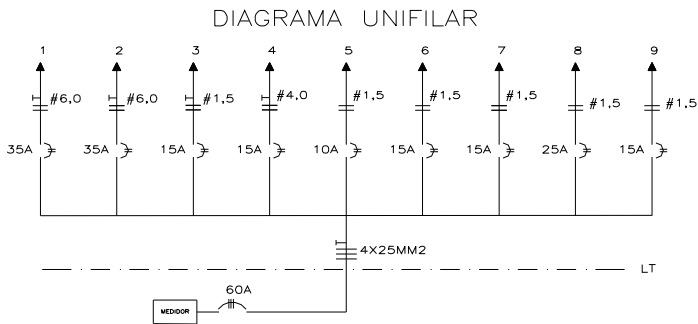


Figura A.6: Detalhe do quadro de distribuição.

Apêndices B

Relatório de Avaliação

Avaliação do Sistema que auxilia no desenvolvimento de um projeto de instalações elétricas residencial.

Avaliador: _____

Data da avaliação: _____

Profissão: _____

Principais finalidades do sistema proposto: Contribuir com os profissionais e estudantes quanto ao desenvolvimento de projetos de instalações elétricas residenciais com o auxílio do software *arqElectrical*.

Os itens 3 a 16 devem ser pontuados de acordo com a seguinte classificação:

1=Fraco, 2=Regular, 3=Satisfatório, 4=Bom, 5=Muito Bom.

1.Você trabalha ou já trabalhou com projetos de instalações elétricas?

() Sim () Não

Há quanto tempo? _____

2.Você já usou algum software de instalações elétricas?

() Sim () Não

Quais: _____

Característica Funcionalidade

3. Sequência exigida pelo *arqElectrical* para a construção do projeto. ☐

Comentários: _____

4. Visualização e atualização simultânea da instalação elétrica em dois ambientes gráficos 2D/3D objetivando facilitar o acompanhamento do projeto. ☐

Comentários: _____

5. Inserção automática da tubulação na instalação elétrica. ☐

Comentários: _____

6. Dimensionamento automático e incremental de *eletrodutos* e condutores durante o andamento do projeto. ☐

Comentários: _____

7. Memorial descritivo gerado pelo Sistema. ☐

Comentários: _____

8. O recurso “desvio de obstáculos” do *arqElectrical*? ☐

Comentários: _____

9.O recurso “menor caminho” para o cálculo do dimensionamento de eletrodutos e condutores. ☐

Comentários: _____

Característica Usabilidade

10.Facilidade em entender os conceitos utilizados. ☐

Comentários: _____

11.Facilidade em aprender a usar o sistema. ☐

Comentários: _____

12.Facilidade em controlar o sistema. ☐

Comentários: _____

Característica Eficiência

13.Tempo de resposta das funções executadas pelo *arqElectrical*. ☐

Comentários: _____

14. Os recursos utilizados são compatíveis com o nível de desempenho requerido para o produto. ☐

Comentários: _____

15. Você recomendaria o uso do *arqElectrical* para o ensino de Instalações Elétricas?

() Sim () Não () Talvez

Comentários: _____

16. Você o recomendaria para ser usado por profissionais de engenharia elétrica?

() Sim () Não () Talvez

Comentários: _____

17. O fato do *arqElectrical* ser independente do AutoCAD é

() Muito Bom () Bom () Regular () Ruim

Comentários: _____

Assinatura do Avaliador:

Índice Remissivo

Restrições geométricas baseado em

construção geométrica

grafos, 15

regras, 14

equações

grafos, 12

numérico, 11

simbólico, 12

Sistemas baseados em Restrições

D-Cubed, 15

Dimension, 12

GCE, 15

INCES, 13

SkyBlue, 13