

1

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas duas décadas tem vindo a afirmar-se uma nova tecnologia, com imenso potencial, baseada na programação em lógica e na computação baseada em restrições. Esta nova tecnologia, conhecida por programação lógica por restrições, tem vindo a conhecer uma aceitação crescente por parte das comunidades de investigadores e de utilizadores. Proporciona uma forma elegante, abstracta e declarativa para especificar problemas. Os sistemas baseados em restrições apresentam uma forte componente teórica, sendo igualmente apelativos para a indústria. Por outro lado, a programação genética e evolucionária tem vindo a afirmar-se como uma alternativa efectiva para a resolução de problemas, permitindo lidar com problemas de grande complexidade, através de um processo que mimetiza a natureza na procura de soluções para uma melhor adaptação das espécies vivas ao meio ambiente. Esta tese tem por objectivo fundamental a exploração destas novas tecnologias para solucionar um problema industrial muito particular, o problema da geração de configurações de sistemas industriais. Este é essencialmente um problema de optimização, caracterizado por possuir um conjunto muito variado de restrições e, um espaço de soluções dificilmente controlável.

1.1 Enquadramento

Um dos problemas deveras complexo em termos industriais é o da geração de configurações de sistemas industriais, em que há que atender a um conjunto muito variado de factores, tais como: as estimativas de vendas e produção; as precedências e compatibilidades entre processos de fabrico; os prazos de entrega; a qualidade; as métricas económicas e financeiras; os requisitos espaciais; os factores relacionados com a gestão e de ordem organizacional; os recursos humanos e os factores ambientais. Para além disso há que garantir a compatibilidade e integração de equipamentos, bem como a adequação da mão-de-obra a utilizar, o que torna extremamente difícil o projecto de geração de qualquer sistema, sobretudo se se tiver em atenção o número extremamente elevado de soluções possíveis. Por essa razão, quer para a concepção de novas plantas fabris ou a alteração das existentes, recorre-se à perícia de especialistas, os quais não dispõem, regra geral, de uma ferramenta computacional eficaz, capaz de os auxiliar, de facto, nessas tarefas.

A geração de configurações de sistemas industriais é um Problema de Projecto do *Layout* de Instalações (PPLI). Formalmente, este pode ser definido como o processo de distribuir recursos, agrupados em instalações, dentro do espaço físico de um edifício, ou seja, um arranjo físico que em termos económicos e financeiros melhor satisfaça os requisitos de fabrico de um dado produto (Figura 1-1). As instalações ocupam, usualmente, uma área bem definida, e podem tomar formas fixas ou variáveis. Uma possível medida de qualidade das soluções apoia-se em métricas de distância entre os diferentes pares de instalações e no seu grau de interacção. Este grau de interacção entre instalações pode ser equacionado em termos qualitativos ou quantitativos.

Estes PPLI foram formalmente definidos pela primeira vez nos trabalhos originais de Armour e Buffa (1963) e Vollman e Buffa (1966). Dada a complexidade e a actualidade do problema, desde então muito trabalho de investigação e desenvolvimento tem vindo a ser realizado. Como resultado têm surgido no mercado ferramentas computacionais cujo objectivo é o de ajudar o especialista na sua resolução (Kusiak e Heragu; 1987, Meller e Gau, 1996; Heragu, 1997). Estas utilizam procedimentos que são normalmente classificados como algoritmos óptimos ou

sub-óptimos. No que se refere aos primeiros, a obtenção da solução óptima para problemas com alguma dimensão tem-se revelado problemática e, portanto, têm sido procuradas outras vias que, embora não levando a soluções óptimas, dão boas soluções em tempo útil. Estes algoritmos inserem-se no grupo dos algoritmos sub-óptimos.

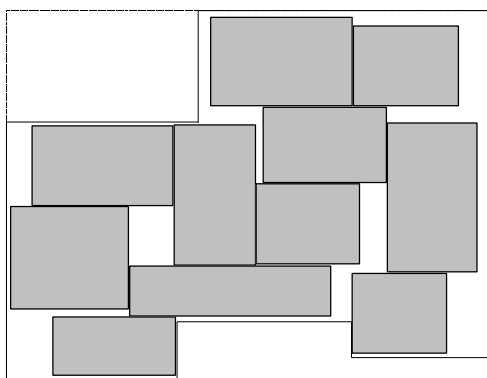


Figura 1-1: Instalações colocadas no interior de uma planta industrial.

Todas as aplicações entretanto desenvolvidas consideram apenas um reduzido conjunto das condicionantes anteriormente referidas (como, por exemplo, as espaciais, de fluxo e de manipulação de materiais). As soluções obtidas para casos práticos, raramente são óptimas, e quando o são, são geradas por procedimentos específicos para os sectores em questão e/ou requerem uma grande interacção com especialistas do domínio. A crescente dinâmica e turbulência dos mercados, nomeadamente no que se refere às crescentes mudanças tecnológicas que afectam os mais diversos tipos de equipamento e métodos de produção, aos menores tempos de vida dos produtos e ao maior número e variedade destes últimos, resulta numa constante necessidade de novas ferramentas, porventura propiciadoras de novos arquétipos e de uma nova postura da indústria no que respeita ao relacionamento com os especialistas dos processos produtivos ou mesmo entre estes.

Na última década emergiu uma tecnologia que tem dado boa conta de si quando aplicada na resolução de problemas complexos, tal como é o caso dos PPLI. Esta tecnologia dá pelo nome de Programação em Lógica por Restrições (PLR) e constitui uma sub-área muito interessante da Programação em Lógica (PL) (Hentenryck e Sarawat, 1997). A PLR combina os aspectos declarativos da PL com as técnicas de

satisfação de restrições, num ambiente propício para a resolução de problemas. A combinação destas duas técnicas tem como objectivo melhorar as estratégias de obtenção de soluções via PL, com recurso ao uso de restrições e asseguradas por técnicas de verificação de consistência dos resultados e análise de contexto. Com este processo procura-se reduzir drasticamente o espaço de procura de soluções.

A PLR tem as suas raízes no trabalho desenvolvido por David Waltz (1972), que apresentou um algoritmo para identificar objectos tridimensionais com base na propagação das restrições impostas pela concavidade ou convexidade das suas arestas. O princípio básico passava por uma técnica de propagação de restrições que respeitava a especificidade do problema, a qual se tornou a base para uma nova área de investigação, que se autonomizou e passou a influenciar outras disciplinas. Esta nova área de investigação atingiu a maturidade com trabalhos do tipo desenvolvido por Jaffar e Lassez (1987) que contribuíram para a unificação destes princípios numa comum estrutura conceptual e prática. Os problemas baseados em restrições podem ser definidos, numa primeira aproximação, como consistindo num conjunto de variáveis e um conjunto de restrições, em que cada restrição denota uma relação entre um subconjunto particular de variáveis. A partilha de variáveis entre diferentes restrições facilita a construção de redes de restrições. O objectivo subjacente à resolução deste tipo de problemas passa por se encontrar a relação entre as variáveis do problema que simultaneamente satisfaçam todas as restrições.

Diversos problemas complexos têm sido solucionados com o recurso à PLR, de que são exemplo os casos típicos do escalonamento, planeamento e a geração de horários. Outras áreas de aplicação vão desde o processamento da linguagem natural, à análise de circuitos e à teoria dos jogos. Verifica-se, nestas aplicações, que o tempo de desenvolvimento é menor, os processos de manutenção encontram-se simplificados e, que em termos de eficiência são em tudo equivalentes à dos programas desenvolvidos em linguagens imperativas.

Uma das grandes vantagens da PLR em tarefas de pesquisa e optimização está na facilidade com que é possível controlar o processo de exploração de soluções. Esta usa mecanismos de pesquisa com retrocesso embebidos na PL. As soluções são obtidas de forma construtiva por um processo de pesquisa em banda com retrocesso.

No entanto, esta via nem sempre é satisfatória, especialmente para problemas de elevada cardinalidade. Quando esta condição se verifica, a escolha do procedimento para a pesquisa e optimização de soluções é crucial para o bom desempenho do sistema, sendo frequentemente seleccionado de uma forma *ad-hoc*. Métodos de procura parcial ou mesmo local são alternativas a considerar para os mecanismos de pesquisa de soluções embebidos na PL. Uma outra possibilidade interessante a considerar passa pela combinação de soluções, isto é, soluções geradas de forma mais ou menos aleatória são recombinadas entre si por forma a se obterem melhores soluções. Este processo é utilizado em técnicas de computação evolucionária inspiradas em processos de evolução natural próprios dos seres vivos, em que se tem como exemplo mais significativo o caso dos Algoritmos Genéticos (AG) (Goldberg, 1989; Davis, 1991; Michalewicz, 1996), aplicados com sucesso na resolução de problemas complexos, como é o caso dos PPLI. As maiores dificuldades na utilização destas técnicas passam por se encontrar uma representação adequada para as soluções do problema e em escolher os operadores que possam ser, em princípio, aplicados à sua evolução.

1.2 Motivação e Objectivos

O trabalho desenvolvido nesta tese foi inicialmente motivado por dois factores. Em primeiro lugar pretendeu-se tratar um problema complexo relacionado com o processo produtivo, que contempla a geração de *layouts* de instalações industriais. Este problema insere-se nas áreas de interesse para o grupo de investigação formado no Centro CIM¹ do ISEP². Por outro lado, e em segundo lugar, pretendeu-se adquirir competências com a nova tecnologia da PLR, que tem vindo a receber uma enorme aceitação para a resolução de alguns problemas relacionados com o processo produtivo (por exemplo, os problemas de escalonamento e planeamento). Deste modo, pareceu possível desenvolver trabalho que permitisse dar uma contribuição na resolução de problemas de planeamento de *layout* de instalações industriais com a

¹ Da sigla inglesa “*Computer Integrated Manufacturing*”.

² ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto.

tecnologia da PLR.

Com base na motivação referida, o trabalho teve como objectivo principal o desenvolvimento de um método para solucionar os PPLI com o recurso à tecnologia da PLR. O método aqui desenvolvido não pretende ser, de forma alguma, uma solução definitiva, atendendo à complexidade do problema tratado e à diversidade de factores em jogo. Por outro lado, é de referir que desde que o problema em questão foi apresentado formalmente nos anos sessenta, tem-se assistido a trabalhos de investigação e desenvolvimento relacionados com muitos dos aspectos abordados nesta tese. Além disso, dada a evolução tecnológica e dos mercados, colocam-se sempre novos desafios ao processo produtivo, em que os PPLI em particular não são excepção.

Para o desenvolvimento do referido método foi necessário, no entanto, especificar quais os tipos de PPLI que se pretendiam tratar e quais são os pressupostos assumidos. Estes factores têm uma influência directa na definição do modelo a adoptar. Por outro lado, há que considerar que o modelo a adoptar tem uma grande influência na qualidade das soluções, bem como na complexidade e desempenho dos métodos utilizados para as determinar. Em termos do problema considerado neste trabalho, os pressupostos em que se alicerça são enunciados no que se segue:

- As instalações são colocadas num plano (planta da unidade fabril);
- O processo fabril, produtos e equipamentos a usar são conhecidos à partida;
- Os produtos a fabricar e o seu volume mantêm-se razoavelmente constantes ao longo do tempo de vida útil da unidade fabril;
- As instalações podem ser colocadas em qualquer local da planta da unidade fabril;
- As instalações são em princípio rectangulares e ocupam uma área pré-definida, sem prejuízo de virem a tomar várias formas dentro de determinados limites.

Considerando os desenvolvimentos realizados para solucionar os PPLI, e atendendo à complexidade do problema, não foram até hoje encontrados métodos

capazes de fornecerem soluções óptimas para casos reais de média e grande dimensão. Todos os métodos desenvolvidos, dependendo do modelo, são apenas capazes de proporcionar boas soluções. Deste modo, foi definido como objectivo que o método a desenvolver deveria ser capaz de fornecer as melhores soluções em tempo útil, atendendo ao facto de que para o modelo adoptado está-se na presença de um enorme espaço de soluções.

Com base neste cenário foi implementado um primeiro sistema de geração automática de *layouts* de instalações industriais. Na sua implementação recorreu-se, fundamentalmente, à tecnologia da PLR e a domínios finitos para as variáveis em jogo. A Figura 1-2 mostra a arquitectura computacional seguida na implementação do sistema, em tudo semelhante à de qualquer aplicação que usa a tecnologia da PLR. Foi ainda entendido como axioma que a definição do modelo computacional seria independente das ferramentas disponíveis para o desenvolvimento de aplicações, embora com o custo de um pior desempenho.

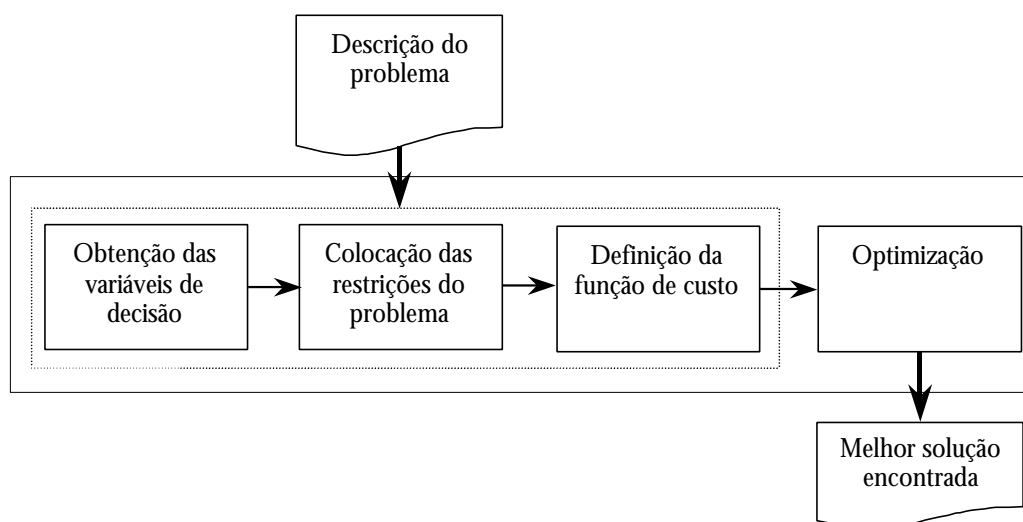


Figura 1-2: Sequência das etapas principais seguida na resolução de PPLI.

Este primeiro sistema, descrito no capítulo 5, utiliza um algoritmo *Branch & Bound (B&B)* (Lawler e Wood, 1966). Atendendo à dimensão do espaço de soluções, este algoritmo é demasiado pesado computacionalmente para fornecer a solução óptima em tempo útil e, como tal, a sua execução é interrompida ao fim de um período de tempo pré-determinado, retornando-se a melhor solução encontrada até esse momento. Atendendo a este senão, foi desenvolvida uma metodologia para a

resolução deste tipo de problemas que combina a tecnologia da PLR com os AG, fornecendo uma alternativa para o *B&B* como algoritmo de otimização. Esta técnica não garante a solução óptima para os problemas, mas garante boas soluções em tempo útil. Foi assim desenvolvido um segundo sistema que segue estes princípios, aplicado na resolução dos PPLI, e que como se demonstra no capítulo 7, é capaz de proporcionar soluções deveras interessantes para o problema em estudo.

1.3 Contribuições Originais

Ao longo desta tese são descritas algumas das contribuições deste trabalho para a resolução dos problemas de *layout* de instalações industriais que passam pela utilização da tecnologia das restrições. Alguns destes contributos envolvem alguma originalidade na sua própria formulação, ou na forma em como se articulam com os restantes. As principais contribuições relacionadas deste trabalho para a resolução dos problemas aqui abordados são enunciadas a seguir:

- O capítulo 4 apresenta um modelo, concebido com o objectivo de solucionar PPLI recorrendo à tecnologia da PLR. Sendo de alguma forma baseado no modelo de Montreuil *et al* (1993), as suas variáveis apenas tomam valores inteiros e num dado intervalo (ou seja, é usada a tecnologia da PLR com domínios finitos), sendo permitidas restrições que modelam especificidades e requisitos próprios de cada instância particular do problema em questão (Tavares *et al.*, 1998; Tavares *et al.*, 1999b);
- Ao contrário das diferentes soluções que surgem na literatura para o problema em questão, a via aqui proposta, e apresentada no capítulo 4, considera a possibilidade de existirem várias instalações com desempenhos diferentes e capazes de realizar a mesma operação (Tavares *et al.*, 1999a; Tavares *et al.*, 1999b), o que é conceptualmente novo relativamente a abordagens anteriores;
- No capítulo 5 é proposta uma heurística, que se pretende original, e que passa pelo uso de restrições que obrigam a que determinadas instalações, cuja taxa de interacção entre si é manifestamente superior à das restantes, sejam colocadas na vizinhança uma das outras (Tavares *et al.*, 1999a). Esta heurística justifica-se,

uma vez que, quanto maior for a interacção entre duas instalações, maior deve ser a proximidade destas, de modo a minimizar os custos de operação;

- A utilização de algoritmos genéticos na geração de *layout* de instalações fabris não é propriamente uma atitude original, uma vez que já existem trabalhos neste domínio (Dimopoulos e Zalzala, 2000). No entanto, a abordagem proposta no capítulo 6 para a utilização de algoritmos genéticos em consonância com a problemática das restrições assume-se já como uma contribuição original, cuja a aplicação não se limita ao problema em questão (Tavares *et al.*, 2000a);
- No capítulo 7 são apresentados operadores genéticos de recombinação e mutação originais, que recorrem ao paradigma da PLR com domínios finitos e, que fazem uso de algum conhecimento do problema em questão (Tavares *et al.*, 2000b). Operacionalmente estes operadores genéticos estão, no entanto, a uma distância considerável dos operadores genéticos clássicos.

1.4 Terminologia

Encontrar termos portugueses que traduzam claramente, e de forma adequada, algumas das construções mais frequentemente encontrados na língua inglesa para as áreas tecnológicas, continua a ser uma tarefa difícil. Esta secção destina-se a apresentar a correspondência usada, ao longo deste trabalho, para alguns dos termos encontrados frequentemente na literatura em língua inglesa relacionados com a PLR e com o *layout* de instalações. Poderão, no entanto, surgir outros termos não referidos nesta secção cuja correspondência possa suscitar dúvidas. Em tais situações opta-se por colocar a respectiva terminologia inglesa em rodapé.

Existem ainda situações, contudo, em que não é possível encontrar uma correspondência adequada para os termos em língua inglesa capazes de expressar correctamente o seu conceito, optando-se, em tais situações, por manter o termo original. Um exemplo desta situação é o termo *layout*. Embora o melhor termo para '*layout*' que se encontrou seja a palavra '*disposição*', esta não consegue exprimir de forma suficientemente adequada o conteúdo semântico do termo original.

A Tabela 1-1 contém a relação dos termos mais em voga quando alguém se pronuncia sobre a problemática do *layout* de instalações. Para cada um destes termos é ainda apresentado um conjunto de correspondências possíveis, sendo destacada aquela que melhor traduz o conceito original quando existe mais do que uma correspondência possível. Por sua vez, a Tabela 1-2 contém a relação dos termos mais usados quando alguém se refere à PLR.

Embora o trabalho descrito nesta tese se relacione essencialmente com os problemas de *layout* de instalações industriais, este tipo de problemas atravessa horizontalmente outras áreas do conhecimento, estando presente, por exemplo, na área dos *layouts* de serviços. Neste caso, as instalações relacionadas com serviços incluem, entre outros, os escritórios, as salas de descanso, os refeitórios, os serviços de atendimento ao público. No entanto, ao longo da tese, o uso do termo instalação, salvo indicação em contrário, relaciona-se com a indústria transformadora.

Tabela 1-1: Termos relacionados com o projecto de *layout*.

<i>Layout</i>	Disposição ; plano; traçado; composição.
<i>Plant</i>	Planta ; fábrica, instalação fabril; instalação de máquinas.
<i>Part</i>	Parte ; fracção; porção dum todo; lote; quinhão; parte ou componente de um produto.
<i>Facility</i>	Instalação ; serviço.
<i>Location</i>	Localização ; determinação da posição; demarcação; situação; estabelecimento num lugar.
<i>Process</i>	Processo ; progresso; método, técnica; curso de operações; encadeamento, série de operações.
<i>Handling</i>	Manipulação , manejo, manejoamento, acção de manejar.
<i>Flow</i>	Fluxo , corrente (líquido).
<i>Assembly</i>	Montagem ; conjunto de peças que constituem uma unidade.

Os PPLI são reconhecidamente problemas de optimização. O objectivo fundamental, quando se trata com este tipo de problemas, está em encontrar soluções que minimizem o custo de operação de uma unidade fabril. Desta forma,

assume-se que o leitor se encontra familiarizado com a terminologia e com os conceitos relacionados com a problemática da optimização de problemas.

Tabela 1-2: Termos relacionados com a programação lógica por restrições.

<i>Constraints</i>	Restrições
<i>Constraint Programming</i>	Programação por Restrições
<i>Constraint Logic Programming</i>	Programação Lógica por Restrições
<i>Constraint Satisfaction Problem</i>	Problema de Satisfação de Restrições
<i>Solver</i>	Meta-interpretador , Solucionador
<i>Finite Domain</i>	Domínio finito
<i>Domain Variable</i>	Variável de domínio

1.5 Organização da Tese

Consistindo principalmente no desenvolvimento de uma metodologia para a resolução de problemas que utiliza a PLR para solucionar PPLI, nomeadamente os problemas relacionados com o processo produtivo, e em face dos objectivos estabelecidos, a tese está organizada em sete capítulos, que se seguem a esta introdução.

O segundo capítulo pretende situar o leitor na área da geração de *layouts* de instalações, e em particular os problemas relacionados com a indústria transformadora. São focados aspectos que envolvem a definição do problema, a identificação da informação que é necessário recolher para solucionar as diferentes instâncias do problema, a descrição dos diferentes parâmetros que podem estar envolvidos na avaliação da qualidade das soluções, a especificação de alguns dos mais conhecidos modelos para este problema e, finalmente, a enumeração de alguns dos principais métodos para solucionar os diferentes modelos do problema em questão, bem como a identificação de alguns dos mais recentes desenvolvimentos neste domínio.

A PLR é tratada com algum detalhe no capítulo 3. Neste capítulo o leitor pode encontrar uma breve introdução aos fundamentos da PLR e aos aspectos

relacionados com o desenvolvimento de aplicações recorrendo à tecnologia das restrições com domínios finitos. Os conceitos gerais relacionados com esta tecnologia são aí introduzidos. Segue-se a caracterização dos problemas de satisfação de restrições, como ponto de partida para a descrição do paradigma da PLR com domínios finitos. Como suporte para os assuntos tratados nos capítulos seguintes, a descrição da PLR com domínios finitos inclui a especificação formal de uma linguagem genérica que permite especificar os problemas segundo o paradigma da PLR.

No quarto capítulo é descrito o modelo desenvolvido para resolução de PPLI usando a tecnologia das restrições. São inicialmente identificados os requisitos de informação necessários à resolução destes problemas. São ainda identificadas as principais variáveis de decisão e os seus respectivos domínios. Finalmente é feita uma análise dos diferentes tipos de restrições envolvidos no problema em questão, com base na linguagem genérica apresentada no capítulo 3.

As questões práticas directamente relacionadas com a implementação de uma aplicação para a geração de *layouts* de instalações, considerando o modelo descrito no capítulo 4, são directamente tratadas no capítulo 5. Neste capítulo é descrito um protótipo (*LaRLo*) que usa o algoritmo *B&B* para as tarefas de optimização. São ainda analisados diferentes heurísticas para a ordem de selecção de variáveis e seus valores na resolução de diversos casos de teste.

No capítulo 6 é descrito um conjunto de técnicas para a resolução de problemas baseadas em processos de selecção natural dos seres vivos, dando-se especial atenção aos AG. É ainda apresentada uma abordagem que permite combinar os AG com a PLR, considerando essencialmente o processo de optimização de soluções. Esta abordagem, denominada por metodologia *GeRL*, pode ser utilizada no desenvolvimento de aplicações que recorrem à tecnologia das restrições.

No capítulo 7 é descrita a utilização da metodologia *GeRL* para solucionar os problemas de *layout* de instalações, que resultou no protótipo *LayGeRL*. Esta descrição assenta essencialmente na representação das soluções e no desenvolvimento de operadores genéticos baseados na PLR e que utilizam algum conhecimento específico acerca da estrutura do problema. São ainda efectuadas

algumas experiências tendo em vista a determinação dos valores para os principais parâmetros do AG que tendem a proporcionar soluções de melhor qualidade. O capítulo termina com uma análise comparativa entre o *LaRLo* e o *LayGeRL*, relativamente à relação entre a qualidade das soluções e o tempo de processamento necessário para as encontrar.

Os comentários finais e as conclusões sobre os resultados obtidos são apresentados no oitavo capítulo. São ainda apontadas algumas linhas a seguir para perspectivar trabalho futuro.

