



## CONCLUSÕES

O trabalho aqui apresentado teve a ver com o desenvolvimento de um sistema de geração de *layout* de plantas industriais pela utilização de uma nova tecnologia, com imenso potencial, baseada na programação em lógica e em processos computacionais que recorrem a restrições impostas sobre as variáveis do problema, conjugada com a utilização de algoritmos genéticos. O sistema desenvolvido procurou tirar partido, por um lado, de um processo iminentemente abstracto e declarativo para a especificação de problemas e, por outro lado, das potencialidades que a computação evolucionária oferece na obtenção de soluções, principalmente quando não existem métodos específicos capazes de solucionar o problema de forma adequada. Como se demonstrou ao longo deste trabalho, a geração de *layout* de plantas industriais é um problema de optimização deveras complexo, em que se tem de atender a um conjunto bastante variado de restrições impostas sobre as variáveis do problema. Este capítulo destina-se, essencialmente, a resumir os resultados obtidos com o sistema desenvolvido de acordo com os objectivos estabelecidos em epígrafe, a referir algumas das principais limitações da solução encontrada e a apontar possíveis desenvolvimentos que no futuro tragam uma maior mais valia ao trabalho

aqui apresentado.

## **8.1 Revisão dos Objectivos, Contribuições e Resultados**

Relativamente à motivação original, que passou por tratar o Problema do Projecto de *Layout* de Instalações (PPLI), nomeadamente os relacionados com a indústria transformadora, bem como o de adquirir competências na tecnologia da Programação em Lógica por Restrições (PLR), pretendeu-se ainda contribuir com um trabalho que visou verificar a aplicabilidade da PLR na resolução de PPLI, tendo-se como objectivo:

- O desenvolvimento de um sistema para solucionar os PPLI, com o recurso a novas tecnologias, nomeadamente à PLR com domínios finitos. Este foi o principal objectivo que se pretendeu atingir, dado o facto dos PPLI serem reconhecidamente problemas NP-completos;
- Desde que os PPLI foram apresentados formalmente, ainda não foram encontrados métodos capazes de encontrar soluções óptimas para casos reais. Atendendo a este cenário, seria demasiada ambição pretender-se contribuir com um sistema que proporcionasse soluções óptimas em todas as situações. Deste modo, ficou estabelecido que o método deveria ser capaz de proporcionar soluções em tempo útil, tão boas quanto possível;
- Finalmente, o sistema a desenvolver deveria ser independente das diferentes ferramentas de programação a serem utilizadas.

Como primeiro passo, para o desenvolvimento do sistema, foram caracterizados os tipos de PPLI que se prendiam solucionar. O modelo adoptado, descrito no quarto capítulo, definiu detalhadamente quais foram as características dos PPLI considerados. Este modelo está próximo do de Montreuil *et al* (1993), no qual foi baseado. No entanto, possui algumas características particulares que o tornam deveras atraente na resolução de PPLI relacionados com a indústria transformadora, principalmente no que diz respeito ao tipo de informação que é necessário

considerar. Esta informação relaciona-se directamente com os produtos a produzir e com os processos de fabrico usados na produção. Por outro lado, devido à tecnologia das restrições com domínios finitos, as variáveis de decisão admitem apenas valores discretos tomados de um dado intervalo, ao contrário do que sucede com outras variantes. As características do modelo adoptado para o sistema podem ser dadas na forma:

- A planta da unidade fabril é representada por um rectângulo que a envolve. Quando a forma da planta não é propriamente rectangular, são usadas restrições que impedem que as instalações sejam localizadas em regiões não pertencentes à planta;
- Os produtos, os equipamentos e os processos usados na produção são conhecidos à partida. Esta informação é de primeira importância para o problema dado que define quais as instalações envolvidas na geração do *layout*. Dependendo dos produtos e do processo é necessário definir como é que o equipamento se agrupa em instalações. Cada instalação, em função do equipamento que possui, requer um região com um dada área mínima, podendo a sua forma ser rígida ou flexível. As regiões da planta ocupadas pelas instalações são também rectangulares. Como contribuição original é considerada a possibilidade de existirem diversas instalações capazes de executarem a mesma operação, porém podendo apresentar diferentes desempenhos (Tavares *et al.*, 1999a; Tavares *et al.*, 1999b);
- Considera-se que os produtos a fabricar mantêm um nível de procura razoavelmente constante ao longo do tempo de vida útil da planta fabril. É este nível de procura que determina o peso que cada produto tem para o custo de operação da planta. Em última análise determina o fluxo entre as instalações;
- As instalações podem ser colocadas em qualquer local da planta fabril. No entanto, a geração de um bom *layout* depende do nível de interacção entre as instalações. De acordo com a função de custo usada para avaliar a qualidade das soluções, os pares de instalações cujo nível de interacção for mais elevado tendem a ser colocadas mais próximas entre si;

- As instalações são colocadas na planta de modo a satisfazer determinadas restrições. As restrições mais óbvias são as restrições que impedem que as instalações se sobreponham no espaço que ocupam na planta. Outro tipo de restrições, são aquelas que asseguram que a área ocupada pelas instalações, respeita os limites impostos. No entanto, podem ser considerados outros tipos de restrições. Estes relacionam-se com as especificidades e requisitos de cada PPLI em concreto e constituem uma contribuição original para a caracterização do problema (Tavares *et al.*, 1998; Tavares *et al.*, 1999b). Estes requisitos específicos podem envolver restrições de natureza tecnológica, geométrica e espacial, ambientais, estratégicas, e devem ser indicadas pelo projectista ao sistema.

O primeiro sistema implementado foi o *LaRLo* e encontra-se descrito em detalhe no quinto capítulo. Este utiliza, como procedimento de optimização, um algoritmo *Branch & Bound (B&B)* comum. Foram conduzidas algumas experiências, considerando diversos procedimentos de etiquetagem para o *B&B* e cinco casos de teste de diferente dimensão e complexidade, de modo a avaliar a qualidade das soluções. Os diferentes procedimentos de etiquetagem consideram sequências alternativas para instanciação das variáveis. Atendendo à dimensão do espaço de soluções, verificou-se que este algoritmo de optimização é demasiado pesado computacionalmente para fornecer a solução óptima em tempo útil e, como tal, as experiências foram realizadas de modo a interromper o processo computacional do *B&B* ao fim de um período de tempo pré-determinado.

Os resultados obtidos levam a concluir que a ordem pela qual a instanciação das variáveis do problema com valores do domínio, bem como a ordem com que os valores do domínio são escolhidos, influencia significativamente não só a qualidade das soluções como o tempo de processamento necessário para as obter, o que não é de todo imprevisível. Recorde-se que o *B&B* é interrompido ao fim de um período de tempo pré-determinado. No entanto, nenhum procedimento de etiquetagem mostrou, para os casos de teste, ser significativamente melhor relativamente à qualidade das soluções que proporciona. As soluções dependem não só do procedimento de etiquetagem usado como também de cada problema em concreto. De qualquer forma, atendendo ao critério seguido na avaliação das soluções, a

utilização de restrições que obrigam a que determinados pares de instalações que possuem um nível elevado de interacção entre si estejam próximas, levam a soluções de melhor qualidade (Tavares *et al.*, 1999a).

As experiências conduzidas com o *LaRLo* mostraram que o algoritmo *B&B* não constitui a escolha mais acertada a aplicar a problemas reais. Como alternativa ao *B&B* optou-se pela utilização de Algoritmos Genéticos (AG). Para isso foi desenvolvida uma metodologia que permite combinar a tecnologia da PLR com os AG. Esta metodologia, denominada metodologia *GeRL* e descrita em detalhe no capítulo 6, não garante a solução óptima para os problemas, mas leva a boas soluções. De uma forma simplificada, foi definido um método para desenvolvimento de aplicações que utilizam um AG em tarefas de optimização num ambiente baseado na PLR. Este AG utiliza uma representação para as soluções do problema e operadores genéticos baseados no conhecimento da estrutura do mesmo. A metodologia *GeRL*, que sintetiza uma prática deveras original na resolução de problemas, não se limita a ser aplicada na resolução de PPLI (Tavares *et al.*, 2000a).

Como resultado da utilização da metodologia *GeRL* na resolução de PPLI, foi desenvolvido o sistema *LayGeRL*. Este sistema, descrito no capítulo 7, é em tudo semelhante ao sistema *LaRLo*, com a excepção do algoritmo de optimização. Os operadores genéticos de recombinação e mutação que se apresentaram são uma das contribuições deste trabalho, dado se basearem no conhecimento da estrutura do problema para a integração de soluções (Tavares *et al.*, 2000b). Esta fusão de soluções é realizada em função da posição e forma das instalações, sendo a sua implementação baseada no paradigma da PLR com domínios finitos. Operacionalmente, estes operadores genéticos estão, no entanto, bastante distantes dos operadores genéticos clássicos, visto que a aplicação destes últimos conduziria à geração de soluções não viáveis com uma grande frequência.

Foram também conduzidas algumas experiências com o sistema *LayGeRL*, tendo como principal objectivo a determinação dos melhores valores para alguns dos principais parâmetros do AG. Estas experiências foram realizadas considerando alguns dos casos de teste. De acordo com os melhores valores determinados para os parâmetros do AG, foram solucionados os cinco casos de teste usados com o

*LaRLo*. Os resultados obtidos mostraram de forma inequívoca que o sistema *LayGeRL* proporciona soluções de melhor qualidade do que o sistema *LaRLo*, em termos de tempos médios de processamento equivalentes.

## 8.2 Problemas Relacionados com o *Layout* de Instalações

O trabalho desenvolvido nesta tese também pode servir de base para alguns problemas reais diferentes do planeamento de *layouts* industriais. Nesta secção são apresentados alguns destes problemas.

Um dos problemas relacionados com o *layout* de instalações é o problema de empacotamento em recipientes<sup>1</sup>. É dado um conjunto de blocos rectangulares e pretende-se que estes sejam colocados dentro de um recipiente com uma largura fixa e uma altura variável. O objectivo principal consiste em procurar um padrão de empacotamento que coloque o conjunto de blocos dentro do recipiente de forma a que a altura seja mínima. A Figura 8-1 apresenta uma solução para um exemplo destes problemas bidimensionais de empacotamento de blocos. Uma forma simplificada de equacionar este problema passa por se considerar o problema de empacotamento apenas a uma dimensão. Nesta situação considera-se que os blocos rectangulares possuem todos a mesma largura. Deste modo, o recipiente pode ser dividido em fatias ou colunas, podendo cada bloco ser colocado em cada uma das fatias. Mesmo os problemas de empacotamento de recipientes com uma dimensão são problemas complexos (Garey e Johnson, 1979). Existem ainda extensões destes problemas para sistemas a três dimensões, sendo a carga de contentores um exemplo. É relativamente simples a adaptação dos sistemas *LaRLo* e *LayGeRL* para solucionar este tipo de problemas. Basta considerar o recipiente como uma planta com uma largura igual à largura do recipiente e o comprimento adequado de modo a aí ser possível colocar todos os blocos. É necessário, no entanto, redefinir por completo a função objectivo.

---

<sup>1</sup> Usa-se a expressão *empacotamento de recipientes* como associação ao termo em língua inglesa *bin-packing*.

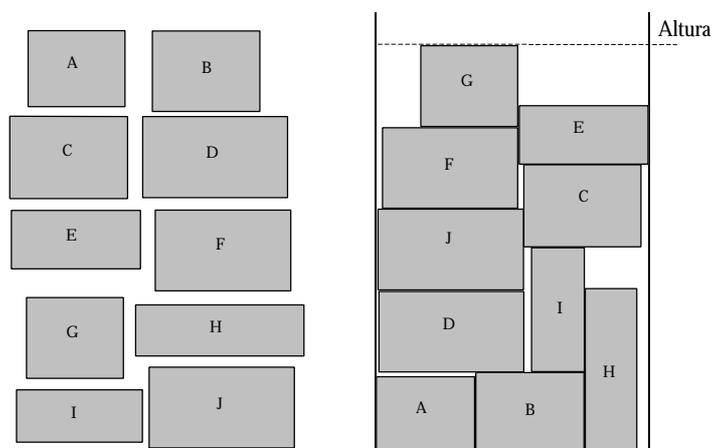


Figura 8-1: Uma solução para um problema de empacotamento com dez blocos.

Outro problema relacionado com o *layout* de instalações industriais é o problema de *layout* de circuitos electrónicos VLSI. VLSI<sup>2</sup> refere-se a uma tecnologia que permite a integração de mais de um milhão de transístores em apenas um circuito integrado. O ciclo de desenvolvimento de circuitos em VLSI passa por diferentes etapas, que vão desde a síntese de alto nível, que corresponde ao desenho funcional, à produção final relacionada com o empacotamento. Uma das tarefas mais complexas é o desenho físico dos circuitos que se caracteriza por transformar a descrição do circuito num *layout* físico. Entenda-se por *layout* a descrição da representação geométrica de todos os componentes do circuito e as formas das pistas que transportam os sinais entre os componentes.

No desenvolvimento de circuitos mais complexos, como é o caso dos microprocessadores, é seguida uma abordagem de desenho por macro-células. Esta abordagem é principalmente usada para a produção de circuitos integrados em massa, dado que proporciona *layouts* de muito boa qualidade. Para o caso dos circuitos produzidos em pequena escala, ou à medida, são normalmente usados circuitos de células padrão ou *gate-arrays*, o que reduz a complexidade do projecto, mas oferece uma menor qualidade dos *layouts*. O processo de desenho do *layout* físico de um circuito começa por dividi-lo em algumas macro-células, que representam unidades funcionais. À volta de cada macro-célula são colocados os seus terminais.

---

<sup>2</sup> A sigla VLSI deve-se à designação em língua inglesa “*Very Large Scale Integration*”.

As macro-células podem possuir formas fixas ou flexíveis. Os terminais em cada macro-célula podem ter um posição variável. Durante a geração do *layout* as macro-células têm de ser colocadas na superfície do *layout* e as ligações têm de ser encaminhadas através do espaço existente entre as macro-células. Os pinos do circuito integrado são colocados à volta da superfície do *layout* para as ligações de entrada e saída. O objectivo principal é a minimização da área total que circunscreve todos os componentes. São ainda tidas em consideração restrições relativas a questões de tempo de transporte de sinal nas ligações, o que limita o seu comprimento máximo. Um exemplo de uma representação esquemática do *layout* de circuito encontra-se ilustrado na Figura 8-2.

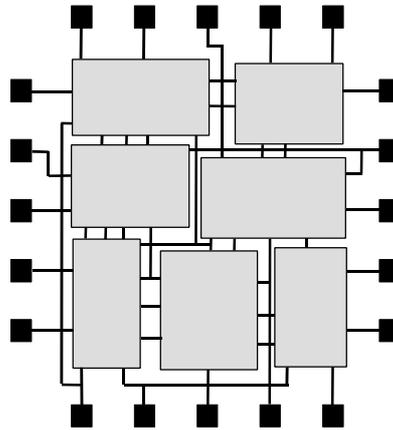


Figura 8-2: Representação esquemática do *layout* de um circuito baseado em macro-células.

Considerando as macro-células como instalações e o número de ligações entre duas macro-células como uma medida do seu nível de interacção, a fase de geração do *layout* das macro-células é bastante idêntica ao da do *layout* de instalações. É preciso, no entanto, considerar algumas restrições adicionais como as que foram referidas, assim como as ligações de entrada e saída. A adaptação dos sistemas *LaRLo* e *LayGeRL* terá de considerar uma função de custo com a componente relativa à área do *layout*.

### 8.3 Limitações e Perspectivas de Trabalho Futuro

De um modo geral as limitações e as perspectivas de desenvolvimentos futuros

dos dois sistemas apresentados em epígrafe podem inserir-se em dois domínios de investigação:

- A modelação dos PPLI de modo a acompanhar as tendências dos novos sistemas industriais;
- A resolução dos PPLI com a tecnologia da programação por restrições com domínios finitos.

### 8.3.1 Modelação de PPLI

O tipo de PPLI tratado considera que todas as instalações possuem uma forma rectangular. Este presuposto nem sempre constitui uma aproximação razoável. Uma abordagem que é bastante adoptada em trabalhos referidos na literatura neste domínio, quando a aproximação a um rectângulo não é aceitável, passa por considerar instalações em forma de um **L** maiúsculo (ver Figura 8-3), embora outras abordagens não sejam de excluir. Esta forma permite um maior aproveitamento de espaço e, no limite, pode tomar a forma de um rectângulo.

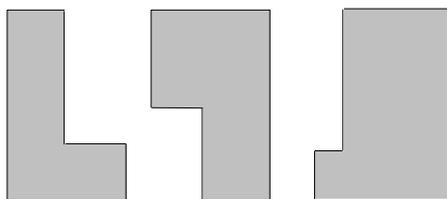


Figura 8-3: Algumas formas em L possíveis para as instalações.

A adopção da forma em L para as instalações como ponto de partida para o desenvolvimento futuro dos sistemas *LaRLo* e *LayGeRL*, obriga à criação de mais variáveis de decisão associadas a cada instalação, sendo também necessário alterar as restrições. Uma abordagem possível pode passar por considerar dois rectângulos em vez de um, os quais seriam colocados de maneira a formarem um L. Flexibilizando a posição relativa de cada um dos rectângulos é possível obter formas como o **T** maiúsculo ou mesmo do género de uma cruz.

Outra premissa considerada na modelação das instalações relaciona-se com o valor de folga, um parâmetro associado a cada instalação e que define qual a distância

mínima relativamente às restantes instalações a que esta deve ser colocada na planta. O modelo adoptado pelos sistemas considera este valor da folga sempre constante, no entanto, embora esta premissa seja adequada à maior parte dos casos, conforme as situações, este valor pode ser diferente dependendo das instalações colocadas na vizinhança. No estado actual dos sistemas, para alguns destes casos especiais, a especificação de um PPLI em concreto deve incluir restrições de distância entre instalações

Os PPLI considerados são de natureza bidimensional, em que o conhecimento das actividades futuras de natureza produtiva é conhecida à partida e o volume dos produtos a fabricar se mantém razoavelmente constante ao longo do tempo. Na secção 2.6 refere-se que, atendendo à tendência que se prevê para os futuros sistemas industriais, estas premissas são cada vez mais difíceis de justificar. Heragu e Kochhar (1994) bem como Bozer *et al.* (1994) consideram que no futuro, os sistemas industriais darão origem a PPLI de carácter tridimensional, atendendo a que as instalações serão distribuídas por diferentes pisos. São apontadas diversas razões para isso, como por exemplo a utilização de máquinas mais leves e o preço das áreas disponíveis serem cada vez mais altos. Esta situação leva a que em desenvolvimentos futuros a terceira coordenada tenha de ser considerada na modelação dos PPLI. Mesmo hoje em dia há imensos casos onde o uso das três dimensões é fundamental para obter bons *layouts* (por exemplo, o transporte de peças pelo topo da instalação) ou até devido às operações em causa (por exemplo, robots invertidos assentes no tecto na indústria aeronáutica).

Actualmente vive-se num mundo com uma forte tendência para um crescente nível de volatilidade e de incerteza, em que cada vez mais companhias actuam num mercado global de grande concorrência, dando origem a uma crescente taxa de inovação tecnológica e mudanças nas especificações dos produtos, estas exigidas pelos consumidores. Todos estes factores contribuem para reduzir o tempo de vida útil de produtos e conseqüentemente de um *layout* fabril, o que dará origem a uma crescente necessidade e frequência de utilização de ferramentas automáticas para a geração de *layouts*.

No entanto, a redução crescente do tempo de vida útil de um *layout* fabril dá

origem a uma nova actividade, o *re-layout* de plantas industriais, que se tornará cada vez mais comum. Esta nova actividade deve considerar, além do custo associado ao fluxo de manipulação de materiais, um custo adicional que está associado com a mudança das instalações da sua posição actual para outro local no novo *layout*. Embora esperando que a mudança de local das instalações possa reduzir o custo do fluxo, considerando este custo adicional de *re-layout*, podem-se encontrar situações em que a mudança física de local de algumas instalações possua custos associados proibitivos, que não compensam a redução de custos de operação com as instalações nos novos locais. Embora com os sistemas desenvolvidos no trabalho apresentado seja já possível tratar de uma forma *ad-hoc* o problema do *re-layout* pelo uso de restrições, que fixam as instalações que devem permanecer na mesma posição, não se incorpora ainda o custo adicional associado à mudança de local das restantes instalações.

Uma das contribuições originais deste trabalho relativamente à modelação dos PPLI consistiu no desenvolvimento de restrições que permitem tratar especificidades e requisitos de cada problema em concreto. Algumas destas restrições são normalmente restrições de proximidade, de distância ou de posição. Todas as restrições colocadas são obrigatórias<sup>3</sup>, ou seja, as soluções geradas satisfazem todas as restrições. Sendo possível expressar estes requisitos específicos de cada problema em concreto, corre-se o risco de não existirem soluções que satisfaçam todas as restrições. Esta situação apresenta-se como um senão para os sistemas desenvolvidos, dado não ser possível prever à partida esta situação. Um mecanismo capaz de efectuar uma meta análise de consistência das restrições poderá detectar mais cedo e em tempo útil os casos que não possuem soluções e, eventualmente, identificar as restrições que estão na origem desta situação, estando previsto abordar este tema em trabalho futuro.

As restrições que permitem tratar especificidades e requisitos de cada problema em concreto nem sempre são obrigatórias, o que é uma limitação dos sistemas aqui apresentados. Algumas constituem condições desejáveis que não precisam de ser

---

<sup>3</sup> O termo original em inglês para designar as *restrições obrigatórias* é “*hard constraints*”.

necessariamente satisfeitas. As condições seguintes dão alguns exemplos desta situação:

- A distância entre a instalação  $i$  e a instalação  $j$  deve ser a maior possível;
- As instalações  $i$  e  $j$  devem estar, preferencialmente, próximas;
- A instalação  $i$  deve estar o mais perto possível da região  $r$ .

Estas condições correspondem a restrições facultativas<sup>4</sup>, que não necessitam de ser obrigatoriamente asseguradas, embora a sua satisfação seja desejável. Actualmente, os meta-interpretadores da PLR disponíveis consideram apenas restrições obrigatórias, embora se conheçam alguns trabalhos de investigação na área da PLR que consideram restrições facultativas com diferentes graus de preferência (Wilson, 1993; Jampel 1996). Com os meta-interpretadores da PLR, em que as restrições são todas obrigatórias, é possível simular este tipo de restrições associando uma variável a cada restrição de forma a determinar se esta é ou não satisfeita. A resolução dos problemas envolve a minimização do custo ponderado da não satisfação das restrições facultativas. Em próximos desenvolvimentos deste trabalho o suporte a restrições facultativas pode passar por esta abordagem.

### **8.3.2 Resolução de PPLI com a PLR**

Podem ser consideradas duas formas de melhorar o desempenho dos sistemas aqui desenvolvidos. Uma delas envolve a concepção de restrições globais adaptadas ao problema em questão. Estas restrições, ditas globais, deverão detectar inconsistências na especificação do problema em tempo útil e eliminar o maior número de ramos da árvore de pesquisa que não levam a soluções válidas. Um ponto de partida possível para a concepção de restrições globais adequadas à resolução de PPLI passa pelo método desenvolvido para problemas de planeamento de espaço descrito na secção 7.2.6.

A outra forma de melhorar o desempenho dos sistemas aqui desenvolvidos

---

<sup>4</sup> O termo original em inglês para designar as *restrições facultativas* é “*soft constraints*”

relaciona-se com o algoritmo de optimização. No *LaRLo* foi utilizado um algoritmo *B&B* que dispõe de um período de tempo limitado para explorar as soluções. Desta forma apenas uma pequena parcela do espaço de soluções é explorada. Ficam, no entanto, por analisar outros métodos de exploração parcial do espaço de soluções como, por exemplo, a exploração das soluções com retrocesso limitado ou o método de pesquisa com crédito.

Relativamente ao *LayGeRL*, interessa referir alguns pontos acerca dos operadores genéticos. Estes, de modo a gerarem boas soluções podem, por vezes, necessitar de um tempo de processamento significativo. No entanto, dado o número de potenciais operações genéticas que têm de ser executadas, estas deveriam ser céleres na geração de soluções, o que leva a considerar um período de tempo máximo de processamento para cada operação genética. Quando este tempo máximo é esgotado na execução de uma operação genética, a mesma é interrompida e considera-se que o operador falhou na geração de soluções. Na secção 7.2.3 apontam-se três vias que podem ser consideradas quando os operadores genéticos falham na geração de soluções.

Um outro desenvolvimento para melhorar o desempenho do *LayGeRL* passa por transformar o seu AG sequencial num AG cujos operadores são executados de forma distribuída. Os operadores genéticos podem ser utilizados de forma síncrona com o AG ou de forma assíncrona. Numa forma síncrona, o AG não avança para a geração de uma nova população ou conjunto de novas soluções para o problema sem que todas as operações genéticas decididas para a geração corrente tenham terminado. Na forma assíncrona, o avanço para a geração seguinte é feito sem que as operações genéticas iniciadas na geração corrente tenham terminado. À medida que se concluem as operações genéticas, os novos indivíduos são inseridos na população por troca com os piores. A Figura 8-4 mostra o esqueleto de um AG distribuído com operadores genéticos assíncronos.

Um desenvolvimento interessante passa por uma colaboração entre o *LaRLo* e *LayGeRL* na geração de soluções. Estes dois sistemas podem ser vistos como dois agentes autónomos que podem cooperar entre si na realização de tarefas. Como mostra a Figura 8-5, o *LaRLo* sempre que encontra uma solução melhor que as

presentes, comunica-a ao *LayGeRL*. Este insere um novo indivíduo, que representa a solução recebida, no conjunto de soluções ou população. Por outro lado, sempre que o *LayGeRL* encontra uma solução melhor, esta é enviada para o *LaRLo*, que em função da solução entretanto recebida, actualiza o valor do limite superior da métrica que mede o custo das soluções a explorar.

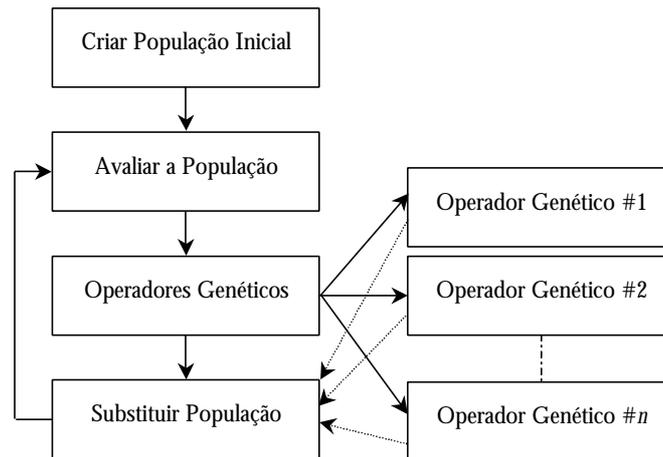


Figura 8-4: Esqueleto um algoritmo genético distribuído com operadores genéticos assíncronos.

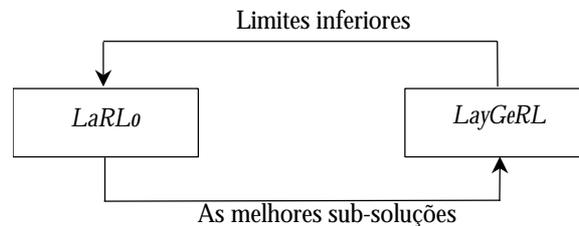


Figura 8-5: Cenário de uma colaboração directa.

Pode-se dizer, para concluir, que num trabalho em que se toca diversas áreas tão abrangentes, torna-se fácil apontar um certo número de cenários para desenvolvimentos futuros. No entanto, a perspectiva integradora que se apresenta é fundamental para que as contribuições que as diversas áreas possam fornecer sejam maximizadas e se relacionem, formando um todo coerente.