

# Sistema Multiagente Baseado em Leilões Combinatoriais Aplicado ao Problema de Transporte de Derivados de Petróleo

Kely Plucinski Vieira, César Augusto Tacla

kely.plucinski@gmail.com, tacla@utfpr.edu.br

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR), Brazil

Av. 7 de Setembro, 3165 – Rebouças CEP 80230-901

Curitiba – PR - Brazil

**Resumo:** Pesquisas recentes mostram que abordagens baseadas em sistemas multiagentes (SMA) e mecanismos de mercado como leilões são eficazes para encontrar soluções factíveis para problemas de planejamento em cadeias de suprimento, que é caracterizada como uma rede de unidades de negócio (produtores e consumidores) que possibilita a coleta de matéria-prima, sua transformação em produtos e a distribuição destes produtos através de um sistema. Inserido neste contexto, este artigo apresenta um SMA que utiliza o mecanismo de Leilões Combinatoriais (LC) e é aplicado ao Problema de Transporte de Derivados de Petróleo da PETROBRAS – Petróleo Brasileiro S/A, tendo como principal objetivo aumentar o escopo de aplicação de mecanismos de leilões combinatoriais em problemas de planejamento de transporte de derivados de petróleo entre produtores e consumidores.

**Abstract:** Recent researches have shown that approaches based on multi-agent systems (MAS) and market mechanisms like auctions are efficient on the resolution of planning problems in supply chains, which is characterized as a network of business units (producers and consumers) that enables collection of raw materials, their transformation into products and distribution of these products through a system. In this context, this paper presents a MAS that uses the combinatorial auction-based and is applied in the problem of transporting oil derivatives of PETROBRAS - Petróleo Brasileiro S/A. The main objective is to enlarge the scope of application of combinatorial-auction mechanisms in planning the transportation of oil between producers and consumers.

**Palabras clave:** Sistemas Multiagentes, Leilões Combinatoriais, Planejamento em Cadeias de Suprimento.

## 1. Introdução

O transporte de derivados de petróleo no Brasil é realizado através de redes multimodais formadas por navios, dutos, ferrovias, hidrovias e rodovias, que deslocam produtos entre locais de armazenamento e pontos de consumo e que formam a Cadeia de Suprimentos (CS) da indústria petrolífera.

Segundo Felizari (2009) o problema de transferência de derivados de petróleo entre os modais pode ser categorizado como um problema de planejamento (planning), onde os objetivos são mais abrangentes e com questões estratégicas ou como um problema de escalonamento (scheduling), onde questões de controle operacional são utilizadas e os objetivos são menos abrangentes.

Diferentes abordagens vêm sendo estudadas com o objetivo de aperfeiçoar o planejamento de tarefas em CS, tais como otimização matemática e SMA. Em Magatão et al. (2008) e em Felizari (2009) são propostos modelos matemáticos baseados em técnicas CLP (Constraint Logic Programming) e MILP (Mixed Integer Linear Programming) para escalonamento de operações de movimentação de derivados de petróleo.

Por outro lado, abordagens baseadas em SMA vêm sendo cada vez mais exploradas, visto que existe uma correspondência natural entre a realidade e o modelo e, podem ser vistos e arquitetados como organizações computacionais, onde os agentes desempenham papéis específicos, interagindo entre si e dentro de uma mesma sociedade (Zambonelli et al., 2003), além disso, gastam menos tempo que os solvers de modelos matemáticos para encontrar soluções factíveis.

Leilões são subclasses dos mecanismos de mercado, e têm recebido atenção particular dentro da área de SMA devido à sua simplicidade, em particular Leilões Combinatoriais (LC) são caracterizados por permitirem que os agentes participantes realizem ofertas para pacotes ou grupos de itens, possibilitando assim que expressem totalmente suas preferências (Cramtom et al., 2006).

Segundo Adomavicius et al. (2005), LC podem realizar alocações mais eficientes do que os leilões tradicionais, pois a avaliação dos itens por parte dos compradores pode ser realizada pela combinação de itens que estejam necessitando e não por itens isolados. Além disso comparações realizadas entre leilões combinatoriais e leilões simultâneos demonstraram que LC são mais eficientes em relação às receitas obtidas pelos leiloeiros (Wilenius, 2009).

Portanto, o presente artigo apresenta um modelo de SMA que utiliza LC como mecanismo de negociação e que é aplicado ao problema de transporte de derivados de petróleo entre bases consumidoras e produtoras, visando aumentar o escopo de aplicação de mecanismos de LC e principalmente, realizar o planejamento do transporte de derivados de modo eficiente, além de servir como uma ferramenta de apoio para o processo de tomada de decisão.

O restante deste artigo está organizado nas seguintes seções: na seção 2 é apresentado o problema de transporte de derivados de petróleo. A seção 3 introduz a ideia dos mecanismos de mercado como leilões e LC, enquanto a seção 4 apresenta o SMA baseado em LC sendo proposto. A seção 5 apresenta os experimentos realizados com o SMA e os resultados obtidos, e a seção 6 apresenta as

discussões e conclusões obtidas com a aplicação do SMA no Problema de Transporte de Derivados de Petróleo.

## 2. O Problema de Transporte de Derivados de Petróleo

O planejamento do transporte de derivados de petróleo é considerado um problema complexo devido à quantidade de restrições de estocagem e de movimentação e da quantidade de elementos do sistema, que é formado por píeres, tanques de armazenamento e dutos que interligam o complexo portuário às refinarias, terminais de armazenamento e pontos de consumo.

Na indústria petrolífera, a atividade de planejamento se refere à alocação de recursos compartilhados para executar o processamento de produtos em um determinado período de tempo. Desta forma, para que não ocorram perdas operacionais faz-se necessário realizar o planejamento das operações de transporte entre todos os elementos da CS, visando aperfeiçoar seus usos (Felizari, 2009).

Neste cenário, bases consumidoras e produtoras são interligadas através de rotas que são utilizadas para realizar o transporte dos derivados, além disso, cada base apresenta faixas de estoque operacional e físico, ou seja, quanto é desejável que uma base tenha de estoque e quanto fisicamente ela pode armazenar.

Uma rota pode possuir diversos tipos de segmentos (dutos, navios e etc.) e possui uma capacidade que deve ser respeitada, sendo assim a realização de um planejamento visa minimizar a sobra ou falta de derivados nas bases produtoras e consumidoras.

Portanto, o problema de transporte de derivados de petróleo (PTDP) se caracteriza por encontrar soluções de planejamento eficientes para o transporte de derivados de petróleo entre as bases da malha de distribuição, soluções estas que visem à redução dos custos de transporte, maximização do atendimento às demandas de escoamento e recebimento dos derivados nos prazos estipulados, além de controle dos níveis de estoque operacional mínimo e máximo em cada base.

### 2.1. Formalização do Problema

Em geral, problemas envolvendo CS podem ser modelados como grafos direcionados, desta forma, segundo Felizari (2009) e Pereira (2011) a malha de distribuição de derivados de petróleo pode ser modelada como um grafo orientado.

No grafo orientado  $G = (V, E)$  o conjunto de vértices  $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$  representa o conjunto de todas as bases (refinarias, pontos de consumo e terminais de armazenamento) consideradas no problema e o conjunto de arestas  $E = \{e_1, e_2, \dots, e_n\}$  representa o conjunto de todos os modais de transporte considerados no problema.

A orientação do grafo  $G$  representa o sentido de transferência de derivados que o modal de transporte pode operar, caso um modal possa operar nos dois sentidos (normal e reverso), ele será representado por uma única aresta com setas indicativas nos dois extremos.

A figura 1 apresenta um exemplo da malha de distribuição de derivados de petróleo da PETROBRAS para algumas bases da região Brasil representada através de um grafo orientado, conforme formalizado acima.

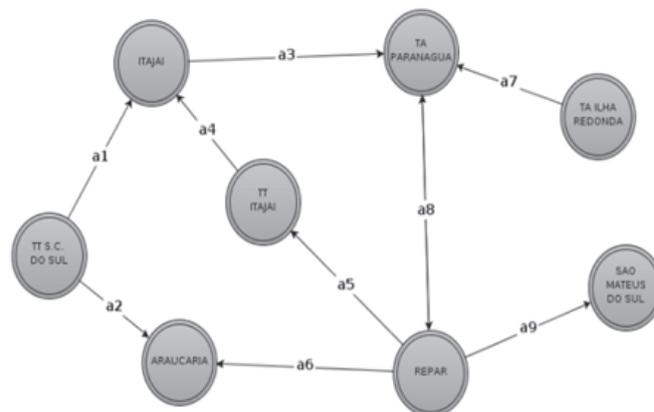


Figura 1. Malha de distribuição de petróleo modelada como um grafo orientado.

## 3. Teoria de Leilões e Leilões Combinatoriais

A teoria de leilões é um ramo da teoria dos jogos que tem por finalidade o estudo comportamental dos participantes de um leilão e, além disso, o estudo de mecanismos para prover a realização dos leilões entre os participantes (Klemperer, 1999). Leilões são categorizados em quatro principais mecanismos: inglês, holandês, primeiro preço e segundo preço (Conitzer, 2010), derivados destes, outros mecanismos de leilões são encontrados, como leilões duplos, simultâneos e combinatoriais.

Leilões Combinatoriais são leilões nos quais os participantes podem realizar ofertas para um conjunto de itens sendo propostos. Sendo assim, diversos itens são colocados simultaneamente à venda, e é permitido aos participantes realizar ofertas para pacotes de itens, ao contrário dos demais mecanismos de leilões, onde cada oferta é realizada para um único item (Vidal, 2007).

Formalmente, um LC é definido por um conjunto  $G = \{y_1, y_2, \dots, y_m\}$  de produtos e por um conjunto  $B = \{b_1, \dots, b_n\}$  de ofertas. Sendo que, uma oferta  $b_i$  é um par  $(p(b_i), g(b_i))$  onde  $p(b_i)$  é o preço proposto na oferta  $b_i$  e  $g(b_i) \subseteq B$  é o subconjunto de produtos requisitados na oferta  $b_i$  (Leyton-Brown, 2003).

Em um LC o leiloeiro deve varrer todo o conjunto de ofertas recebidas e encontrar o ganhador do leilão, que é o participante que propôs a melhor oferta. Isto ocasiona o problema conhecido como problema de Determinação do Vencedor (WDP), que consiste em encontrar uma alocação eficiente, cujas ofertas maximizem a receita do leiloeiro. Este problema é considerado complexo (NP-Completo), visto varia de acordo com o mecanismo de leilão utilizado, a quantidade de compradores e a quantidade de produtos sendo ofertados.

## 4. Sistema Multiagente Baseado em Leilões Combinatoriais

Foi desenvolvido um SMA, onde os principais elementos do problema PTDP foram modelados como agentes que negociam entre si para realizar o planejamento do transporte dos derivados, basicamente agentes que representam as bases produtoras e consumidoras. O mecanismo de negociação entre os agentes é baseado no mecanismo de leilões combinatoriais, onde o leiloeiro realiza o leilão para diversos derivados e o consumidor realiza ofertas de compra para pacotes de itens.

No sistema, cada base produtora executa um LC para o conjunto de produtos que possui com estoque positivo e envia uma proposta de venda para cada base consumidora, que decide participar ou não do LC. Portanto, no SMA diversos LC podem ser executados simultaneamente.

Caso uma base consumidora decida participar de um leilão, ela deve montar uma oferta de compra, que é composta por um subconjunto de produtos e um preço. Foi desenvolvida uma heurística para determinação de preço, que considera o quão longe a base consumidora  $b$  está do estoque máximo para cada produto  $p$  pertencente ao conjunto de produtos  $P$ , desta forma, quanto maior a distância entre o estoque necessário por produto  $En(p,b)$  e o estoque máximo por produto  $Em(p,b)$ , maior é o preço que a base consumidora envia na oferta.

De modo a resolver o problema WDP, foi implementado o algoritmo CABOB (*Combinatorial Auction Branch on Bids*) proposto por Sandholm et al. (2005) e que busca encontrar uma solução ótima na determinação do vencedor. O algoritmo utiliza técnicas de decomposição, limites e poda no grafo de ofertas. A fim de realizar o planejamento de envio de todo o volume disponível para o conjunto de produtos, cada base produtora encontra um ou mais vencedores para o leilão que está executando, sendo estes os consumidores cujas ofertas são melhor em relação ao preço e produtos.

O SMA foi codificado em linguagem Java sobre a plataforma de desenvolvimento de agentes JADE (Java Agent Development Framework) e é composto dos seguintes tipos de agentes: (i) *Manager*: realiza a leitura dos dados do cenário de entrada e identifica as bases que irão compor os conjuntos de leiloeiros e compradores; (ii) *Auctioneer*: executa o LC para os produtos que possui com estoque positivo e escolhe os agentes vencedores do leilão; (iii) *Bidder*: participa de todos os LC e propõe ou não uma oferta de compra para cada leilão; (iv) *ManagerModal*: cria os agentes que representam os modais de transporte e gerencia a alocação e desalocação destes modais; (v) *Modal*: representa o modal de transporte que liga as bases produtoras e consumidoras. O algoritmo 1 contempla o pseudocódigo do SMA baseado em LC desenvolvido.

### Algoritmo 1 – Sistema Multiagente baseado em Leilões Combinatoriais aplicado ao PTDP

#### Agente MANAGER

**Comportamento de inicialização:** iniciado com o lançamento do SMA

**DADOS** ← *DadosFromXML()* // leitura do cenário de teste

**AUCTIONEER** ← *BuscaProdutores(DADOS)*

**BIDDER** ← *BuscaConsumidores(DADOS)*

**MODAIS** ← *BuscaEgumentos(DADOS)*

Cria agente MANAGER MODAL

Para cada  $p_i \in \mathbf{AUCTIONEER}$

Cria agente  $p_i$

Para cada  $c_i \in \mathbf{BIDDER}$

Cria agente  $c_i$

Para cada  $p_i \in \mathbf{AUCTIONEER}$

Envia mensagem de início de leilão

Inicia comportamento de finalização de leilões

**Fim de comportamento**

**Comportamento de finalização de leilões:** iniciado por outro comportamento

**leilõesFinalizados** = 0

wait INFORM-REF // Mensagem de finalização de leilão

enquanto (**leilõesFinalizados** < |**AUCTIONEER**|)

**leilõesFinalizados** = **leilõesFinalizados** + 1

wait INFORM-REF // Mensagem de finalização de leilão

Destroi todos os agentes.

**Fim de comportamento**

#### Agente MANAGER MODAL

**Comportamento de inicialização:** iniciado com o lançamento do SMA

Para cada  $m_i \in \mathbf{MODAIS}$

Cria agente  $m_i$

**Fim de comportamento**

#### Agente AUCTIONEER $p_i$

**Comportamento de início de leilão:** ao receber mensagem PROPAGATE que indica início de leilão

**ProdutosOfertar** ← *ProdutosEstoquePositivo()*

Para cada  $c_i \in \mathbf{BIDDER}$

Envia mensagem de CALL-FOR-PROPOSAL para todo

$c_i \in \mathbf{BIDDER}$  // Chamada de ofertas

Inicia comportamento de recebimento de ofertas

**Fim de comportamento**

**Comportamento de recebimento de ofertas:** iniciado por outro comportamento

**OfertasRecebidas** ← {}

Iniciar contagem de *time limit* para recebimento de ofertas

**tl**

Wait término da contagem de **tl** ou (PROPOSE ou REFUSE) // Mensagens que indicam proposta ou recusa de oferta

**OfertasRecebidas** ← **OfertasRecebidas** U mensagem de oferta

Retorna ao wait

Inicia comportamento de tratamento de ofertas

**Fim de comportamento**

**Comportamento de tratamento de ofertas:** iniciado por outro comportamento

Se **OfertasRecebidas** ≠ {} então

**VENCEDOR**  $v_i$  ← *executaCABOB(OfertasRecebidas)*

**PossuiRota** ← *VerificaRota(pi,vi)*

Se (**PossuiRota**) então  
 Envia mensagem ACCEPT-PROPOSE para agente vencedor  $v_i$   
 Envia mensagem REJECT-PROPOSE para todo agente  $c_i \neq v_i$   
 Inicia comportamento de confirmação de ofertas

Se não  
 Retira oferta do agente  $v_i$  de **OfertasRecebidas** e retorna ao primeiro passo deste comportamento

**Fim comportamento**

**Comportamento de confirmação de ofertas:** iniciado por outro comportamento

**Resposta** ← **AguardaResposta**( $v_i$ )

Se (**INFORM**) então // Recebeu mensagem de confirmação de compra do vencedor  
 Envia mensagem INFORM-REF para agente **Manager**

Se não  
 Retira oferta do vencedor  $v_i$  de **OfertasRecebidas**  
 Inicia comportamento de tratamento de ofertas

**Fim comportamento**

**Agente BIDDER  $c_i$**

**Comportamento de chamada a ofertas:** iniciado ao receber mensagem CALL-FOR-PROPOSAL

**PrecisaProdutos** ← **VerificaNecessidadeAtual**()  
 $p_i$  ← **sender**(chamada de ofertas)

**PossuiRota** ← **VerificaRota**( $c_i, p_i$ )

Se (**PrecisaProdutos** & **PossuiRota**) então  
 $c_i$  monta mensagem PROPOSE e envia para  $p_i$

Se não  
 $c_i$  monta mensagem REFUSE e envia para leiloeiro  $p_i$

**Fim de comportamento**

**Comportamento de vencedor:** iniciado ao receber mensagem de oferta aceita

**PrecisaProdutos** ← **VerificaNecessidadeAtual**()

Se (**PrecisaProdutos**) então  
 Envia mensagem PROPOSE para leiloeiro  $p_i$  // Indica concordância de compra

Se não  
 Envia mensagem REFUSE para leiloeiro  $p_i$  // Indica não concordância de compra

**Fim de comportamento**

De modo a realizar a troca de mensagens entre os agentes do sistema foi utilizando o protocolo Contract-Net, por ser um protocolo de alto nível e que facilita a comunicação entre os nós de um sistema. A Figura 2 apresenta o diagrama de seqüência da troca de mensagens que é realizada entre os agentes do SMA desenvolvido.

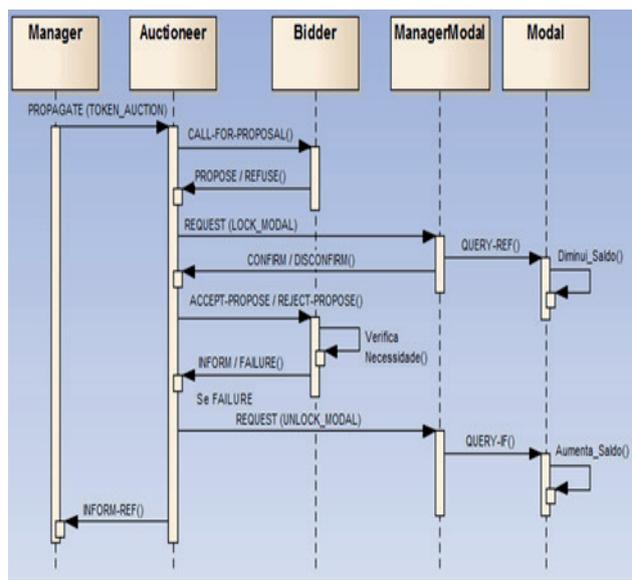


Figura 2. Diagrama de seqüência da troca de mensagens entre os agentes.

Como pode ser observado na figura 2, os agentes do tipo Auctioneer controlam toda a execução do LC que executam, desta forma, conseguem em somente uma rodada encontrar um ou mais vencedores para o leilão, objetivando alcançar o planejamento do transporte de todo o volume disponível para o conjunto de produtos entre as bases consumidoras que representam os vencedores.

**5. Experimentos e Resultados**

Para testar o SMA desenvolvido, foram utilizados cinco de cenários de teste, variando-se a quantidade de agentes produtores e consumidores que representam as bases. Como métrica de teste foi utilizada a diferença de balanço inicial e final das bases produtoras e consumidoras onde foi verificado o percentual de bases que em cada cenário conseguiram atingir o balanço meta igual a zero, ou seja, escoar ou receber todo o volume de produtos que possuíam ou necessitavam.

A tabela 1 apresenta os dados de cada cenário de teste utilizado.

Cenário	Produtores	Consumidores	Número de Produtos	Rotas de Fluxo
1	1	2	3	2
2	5	10	3	50
3	6	10	3	60
4	6	15	3	90
5	10	30	2	300

Tabela 1. Síntese dos Cenários de Teste.

Foi realizada a comparação do balanço inicial de cada base produtora com o valor alcançado ao final da execução de um Leilão Combinatorial e foi verificado se a base conseguiu atingir o balanço meta igual à zero para todos os produtos que estava ofertando, a Figura 3 apresenta o quadro comparativo destes resultados.

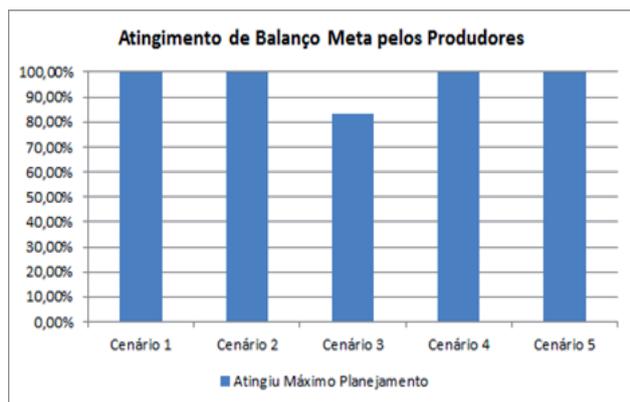


Figura 3. Comparativo dos produtores que atingiram o balanço meta.

Percebe-se que em quatro dos cinco cenários de teste todas as bases produtoras conseguiram atingir o balanço meta para todos os produtos. Ao analisar o motivo de no cenário 3 o balanço meta não ter sido atingido, percebe-se que isto ocorreu devido a necessidade das bases consumidoras ser muito maior do que o volume que as bases produtoras possuíam para escoar.

Também foi realizada a comparação dos balanços inicial e final de cada base consumidora em todos os cenários de teste e foi analisado o percentual de bases consumidoras que conseguiram ser satisfeitas totalmente, parcialmente ou que não foram satisfeitas, a Figura 4 apresenta o quadro comparativo com estes resultados.

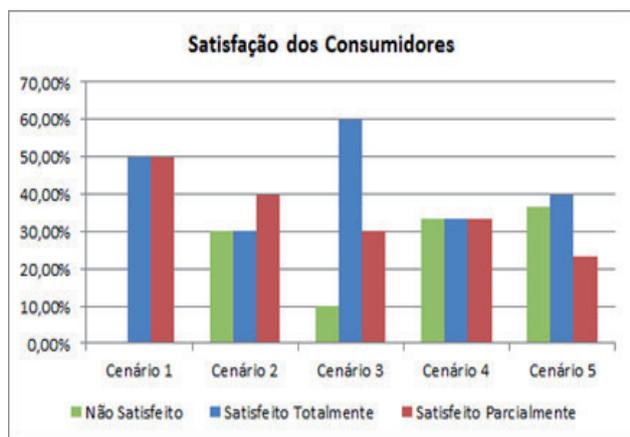


Figura 4. Percentual geral de satisfação dos agentes consumidores.

Analisando o quadro comparativo da figura 4, percebe-se que em todos os cenários as bases consumidoras que foram satisfeitas totalmente e parcialmente representam 43% e 33% respectivamente, onde somente 22% delas não foram satisfeitas.

Outro ponto importante e que completa o resultado anterior é que o cenário 3 foi o que teve a maior quantidade de bases consumidoras totalmente satisfeitas em comparação com o resultado alcançado nos demais cenários de teste.

## 6. Discussões e Conclusões

Abordagens baseadas na teoria de leilões têm sido largamente estudadas e desenvolvidas juntamente com abordagens baseadas em SMA, com o objetivo de

encontrar soluções para problemas complexos de planejamento em cadeias de suprimento.

Conforme foi apresentado neste artigo, conclui-se que a utilização de leilões combinatoriais com SMA aplicado ao problema de planejamento de transporte de derivados de petróleo pode ser uma proposta interessante para atingimento de soluções eficientes, visto que em todos os cenários de teste, o percentual de bases produtoras e consumidoras que conseguiram atingir o balanço meta igual a zero foi superior ao das bases que não o conseguiram.

Por fim, conclui-se que a proposta baseada em Leilões Combinatoriais e Sistemas Multiagentes apresenta potencial para ser utilizada como uma ferramenta de apoio à tomada de decisão por especialistas da indústria petrolífera na realização do planejamento do transporte de derivados de petróleo.

## Referências bibliográficas

- [Adomavicius, 2005] Adomavicius, G.; Gupta, A. (2005). Toward Comprehensive Real-Time Bidder Support in Iterative Combinatorial Auctions. *Information Systems Research*, pp. 169-185.
- [Cramtom, 2006] Cramtom, P.; Shoham Y.; Steinberg, R. (2006). *Introduction to Combinatorial Auctions*. Combinatorial Auctions, MIT Press, Cambridge, MA, 2006, pp. 01-13.
- [Conitzer, 2010] Conitzer, V. (2010). Comparing Multiagent Systems Research in Combinatorial Auctions and Voting. *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, pp. 239-259.
- [Felizari, 2009] Felizari, L. C. (2009). *Programação das Operações de Transporte de Derivados de Petróleo em Redes de Dutos*. Tese de Doutorado, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- [Klemperer, 1999] Klemperer, P. (1999). Auction theory: A guide to the literature. *Journal of Economics Surveys*, 1999, pp. 227-286.
- [Leyton-Brown, 2003] Leyton-Brown, K. (2003). *Resource Allocation in Competitive Multiagent Systems*. Tese de Doutorado. Stanford University, 2003.
- [Magatão, 2008] Magatão, L.; Arruda, L.V.R.; Neves-jr, F. (2008). Um Modelo Híbrido (CLP-MILP) para Scheduling de Operações em Polidutos. *Pesquisa Operacional*, v. 28, pp. 511-543.
- [Pereira, 2011] Pereira, F. R. (2011). *DCOP MOASSÍ: Otimização de Restrição Distribuída em Problemas Contínuos de Fluxo em Rede pela Unificação da Discretização e Resolução*. Dissertação de Mestrado, UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2011.
- [Sandholm, 2005] Sandholm, T.; Suri, S.; Gilpin, A.; Levine, D. (2005). CABOB: A Fast Optimal Algorithm for Winner Determination in Combinatorial Auctions. *Management Science*, Vol. 51, 2005, pp. 374-390.

[Vidal, 2005] Vidal, J. M. (2007). "Fundamentals of Multiagent Systems with NetLogo Examples". 2007.  
[Zambonelli, 2003] Zambonelli, F.; Jennings, N. R.; Wooldridge, M. (2003). Developing Multiagent

Systems: The Gaia Methodology. ACM Transactions on Software Engineering and Methodology, v.12, pp. 317-370.