

Decisão Consensual em Sistemas Multirrobo

Vivian Cremer Kalempa¹, André Schneider de Oliveira²

¹Departamento de Sistemas de Informação
Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC)
Rua Luiz Fernando Hastreiter, 180 – 89.283-081
São Bento do Sul – SC – Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial
Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR)
Avenida 7 de Setembro, 3165 – 80230-901
Curitiba – PR – Brazil

vivian.kalempa@udesc.br, andreoliveira@utfpr.edu.br

Abstract. *This thesis aims to generate solutions to manage the collective behavior of multi-robot systems in smart factories to obtain resilience to failures. Thus, a consensus-based, fault-resilient mechanism called Consensual Fault-Resilient Behavior (CFRB) is presented. CFRB is methodized in three hierarchical plans: imposition, negotiating, and consensus. The fault restoration is a consequence of collective behavior managed through the ternary decision in these plans. The approach contributes to production improvements in smart factories, where autonomous multi-robots are employed to improve reliability and robustness in the occurrence of failures. Experiments were conducted to show the benefits of the proposed solutions as well as quantitative analysis. In addition, the CFRB was compared with other current approaches, and the results are presented, demonstrating its efficiency.*

Keywords: *Multi-robot systems. Fault Resilience. Consensus. Smart Factories.*

Resumo. *Essa tese tem como objetivo gerar soluções para gerenciar o comportamento coletivo de sistemas multirrobo em fábricas inteligentes para obtenção de resiliência à falha. Assim, um mecanismo resiliente à falha, baseado em consenso, denominado Consensual Fault-Resilient Behaviour (CFRB) é apresentado. O CFRB é metodizado em três planos hierárquicos: imposição, negociação e consensual. A restauração de falhas é consequência do comportamento coletivo administrado por meio da decisão ternária nestes planos. A abordagem contribui para melhorias de produção em fábricas inteligentes, onde multirrobo autônomos são empregados para melhorar a confiabilidade e robustez na ocorrência de falhas. Experimentos foram conduzidos para mostrar os benefícios das soluções propostas, bem como uma análise quantitativa. Além disso, o CFRB foi comparado com outras abordagens atuais e os resultados são apresentados, demonstrando sua eficiência.*

Palavras-chave: *Sistemas multirrobo. Resiliência à falha. Consenso. Fábricas inteligentes.*

Este trabalho é o resumo da tese de doutorado intitulada de “Decisão consensual em sistemas multirrobo”, orientado pelo professor André Schneider de Oliveira e defendida no Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica e Informática Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em 14 de dezembro de 2021. Esse documento tem por finalidade apresentar a tese de doutorado ao Concurso de Teses e Dissertações em Robótica (CTDR-2022), para concorrer na categoria de melhor tese de doutorado. O documento de tese completo pode ser acessado em <https://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/27084>. Esse trabalho foi contribuição direta para um congresso [Kalempa et al. 2018], dois capítulos de livros [Kalempa et al. 2020b] [Kalempa et al. 2021b] e duas revistas internacionais [Kalempa et al. 2020a] [Kalempa et al. 2021a]. Contribuições secundárias deste trabalho estão presentes em um congresso [Limeira et al. 2019], um capítulo de livro [Limeira et al. 2020] e duas revistas internacionais [Piardi et al. 2019] [Limeira et al. 2021].

1. Introdução

Os sistemas multirrobo (em inglês, *Multi-Robot System* - MRS) são introduzidos nas indústrias para melhorar a produção e aumentar a flexibilidade. Dessa forma, os robôs autônomos devem trabalhar como operadores em processos atribuídos dinamicamente, onde um processo é entendido como um conjunto de tarefas. A tarefa é um subobjetivo necessário para atingir o objetivo geral do sistema, que pode ser realizado independentemente de outros subobjetivos [Gerkey and Mataric 2004]. No entanto, a alocação de processos não deve apenas garantir que toda a missão seja alcançada, mas também que as tarefas dos processos sejam distribuídas de maneira produtiva e eficiente entre os robôs. Uma abordagem útil de alocação de processos deve considerar os recursos disponíveis, os fatores a serem otimizados e a capacidade dos robôs [Yogeswaran and Ponnambalam 2010]. Esse é um dos principais problemas a serem solucionados em MRS, conhecido como problema de alocação de tarefas para sistemas multirrobo (em inglês, *Multi-Robot Task Allocation* - MRTA).

Os benefícios do emprego de um MRS dependem da decomposição eficiente dos processos de produção, porque cada robô autônomo ou grupo é responsável por realizar uma tarefa do processo. A alocação de processos no MRS não é trivial, especialmente quando se considera robôs autônomos heterogêneos, equipados com recursos diferentes, projetados para executar vários processos distintos com vários requisitos e restrições [Khamis et al. 2015]. MRTA é um tema amplamente discutido, onde os desafios são a alocação de processos complexos, alocação de processos dinâmicos, alocação de processos altamente restritos e alocação heterogênea.

1.1. Objetivo Geral

Essa tese tem por objetivo propor e avaliar uma nova abordagem resiliente à falha baseada em decisões consensuais para tratar o problema de alocação de processos (conjunto de tarefas) para sistemas multirrobo, aplicando preempção de processos e o conceito de políticas prioritárias, levando em consideração as restrições do ambiente e a dependência entre as tarefas dos processos.

2. ARENA

A ARENA foi utilizada como ambiente de experimentação para avaliação das abordagens propostas nessa tese. A ARENA foi desenvolvida em uma estrutura ciber-física que reproduz uma planta industrial real, em uma escala reduzida, conforme mostrado na Figura 1. Os robôs percebem esse ambiente virtual como uma planta real e memorizam o ambiente por meio de suas fontes de percepção (ou realizam mapeamentos). O objetivo é utilizar a ARENA combinada com um MRS e realidade mista para demonstrar um sistema de armazém autônomo. Informações mais detalhadas sobre a ARENA real podem ser obtidas em [Piardi et al. 2019].

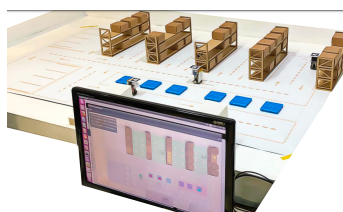


Figura 1. ARENA: experimentação com realidade mista [Kalempa et al. 2020a].

3. Escalonador com políticas prioritárias e preempção de processos

O artigo publicado em [Kalempa et al. 2021a] apresenta um escalonador para resolver o problema MRTA, baseado em políticas prioritárias e preempção de processos. A abordagem é chamada de *Multi-Robot Preemptive Process Scheduling with Fault Resilience* (MRPF). É uma abordagem para projetar a distribuição de multirrobôs, levando em consideração restrições dos robôs, restrições de processos, prioridade de trabalho e dependência de recursos. A abordagem é focada na distribuição durante a execução, gerenciando a interação dos processos, supervisionando os recursos compartilhados, introduzindo novos recursos dinâmicos, como precedência e preemptabilidade.

4. Comportamento ternário-hierárquico coletivo resiliente à falha

O artigo publicado em [Kalempa et al. 2020a] apresenta uma abordagem que é uma expansão do MRPF e que leva em consideração o comportamento coletivo de sistemas multirrobôs em fábricas inteligentes para obter resiliência à falha. A proposta está organizada em um plano de três níveis: execução, negociação e consensual. A recuperação de falhas é uma consequência do resultado do gerenciamento de ações coletivas por meio de decisões ternárias nesses planos. Este método ajuda a melhorar a eficiência da produção da fábrica inteligente, representada pela ARENA. Assim, quando ocorre uma falha, vários robôs são usados para melhorar a confiabilidade e a robustez do sistema como um todo.

5. Decisões Consensuais em Sistemas Multirrobôs

Essa seção apresenta um mecanismo resiliente à falha, baseado em consenso, denominado *Consensual Fault-Resilient Behaviour* (CFRB). A abordagem proposta é baseada na abordagem MRPF, apresentada na Seção 3, e nos três planos hierárquicos, apresentados na Seção 4. O diferencial da solução apresentada nessa seção está no nível consensual. Por ser adequado para a análise e projeto de comportamento coordenado entre robôs autônomos, o plano consensual foi reestruturado e melhorado. O plano consensual proposto considera características importantes dos robôs no momento da tomada de decisão

e sempre leva em consideração o que é melhor para o coletivo, e não somente de forma individual. O CFRB foi experimentado e avaliado utilizando a ARENA. Além disso, a proposta foi comparada com outras abordagens atuais da literatura e os resultados são apresentados, demonstrando sua eficiência.

5.1. Comportamento Consensual Resiliente à Falha

O CFRB é um método para que o MRS apresente um comportamento resiliente à falha por meio de uma decisão coletiva. A obtenção da decisão se dá por meio do processamento dos três níveis hierárquicos apresentados em [Kalempa et al. 2020a], sendo eles: imposição, negociação e consensual. O nível de imposição continua sendo realizado pelo escalonador. O nível de negociação envolve os processos que estão em execução no momento em que uma ou mais falhas ocorrem. Por fim, o nível consensual é realizado pelos robôs de cada grupo de processo, porém, de forma diferente. A ilustração das camadas hierárquicas é apresentada na Figura 2, com destaque para a alteração do último nível.

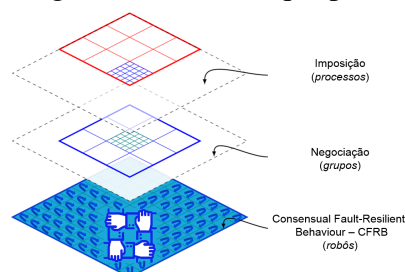


Figura 2. Níveis hierárquicos da abordagem CFRB.

A resiliência à falha acontece por meio das decisões tomadas nos três planos apresentados na Figura 2. O plano de imposição dita as condições iniciais para a tomada de decisão no plano de negociação. O plano de negociação dita as condições para a tomada de decisão em consenso pelo grupo de robôs de cada processo que irá precisar liberar algum robô para atender uma falha. Como os níveis de imposição e negociação não sofreram alterações, essa seção apresenta somente a alteração realizada no nível consensual.

5.1.1. Plano consensual

O terceiro e último nível da abordagem CFRB é o plano consensual. Após decidido pelo plano de negociação qual processo irá liberar robôs, a equipe decide qual robô irá ser liberado para suprir a falha em outro processo. O plano consensual apresentado nessa seção difere do apresentado em [Kalempa et al. 2020a], onde a decisão no plano consensual era tomada por meio de votação. Na abordagem CFRB, a decisão é tomada com base em um conjunto de características por todos os membros do grupo. Assim, a decisão deixa de ser baseada em interesse individual para passar a ser de interesse coletivo.

No plano consensual, um membro da equipe de robôs do processo que precisa ceder robôs é eleito como gerente do grupo, de acordo com o algoritmo Raft de eleição do líder [Ongaro and Ousterhout 2014]. A função do gerente do processo é determinar entre todos os membros quais estão aptos a participar do consenso, ou seja, os robôs que não apresentam falhas. O robô gerente transmite por mensagem essa lista aos demais robôs da equipe para que o consenso seja iniciado e ele aguarda a resposta da maioria dos seguidores. Ao receber o retorno da maioria dos membros da equipe, o gerente do processo noti-

fica os demais membros sobre qual membro foi escolhido. Essa etapa do plano consensual também foi inspirada no algoritmo Raft apresentando em [Ongaro and Ousterhout 2014].

Dois sistemas de decisão Fuzzy foram desenvolvidos utilizando o modelo Mandani para determinar a escolha do melhor robô a ser votado por cada membro do grupo. Caso a prioridade do processo que necessita robôs seja superior a do processo atual do robô do grupo de robôs que está entrando em consenso para determinar quem deixará o grupo, a abordagem consensual fará uso de um sistema de decisão Fuzzy para prioridades superiores. Caso contrário, utilizará um sistema de decisão Fuzzy para prioridades inferiores (Figura 3). Um sistema de decisão Fuzzy é uma alternativa prática para muitas aplicações de controle desafiadoras porque fornecem uma maneira conveniente de construir sistemas de decisão usando informações heurísticas [Passino et al. 1998].

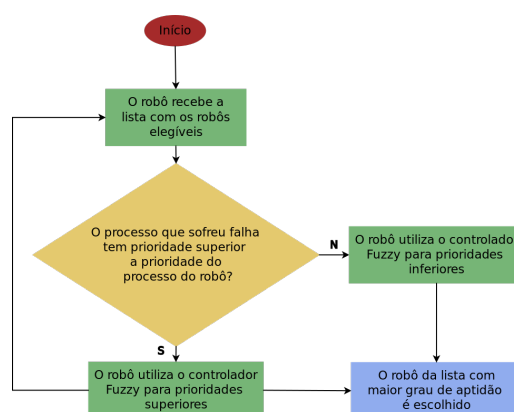


Figura 3. Fluxograma referente aos sistemas de decisão Fuzzy.

As entradas e a saída dos dois sistemas de decisão Fuzzy desenvolvidos são as mesmas, apresentadas na Figura 4. A primeira entrada, chamada de *distância da tarefa atual*, irá analisar a informação da distância no grafo de posições da ARENA que o robô tem da tarefa que ele está executando. Isso é possível pois o processo logístico foi decomposto em vários estados específicos, agrupados em super estágios para cada setor. Dessa forma, esses estágios foram organizados em uma máquina de estado global que representa todo o processo de logística do armazém [Kalempa et al. 2021a]. As transições da máquina de estado indicam a direção que as empilhadeiras podem seguir, o que evita possíveis colisões entre elas. Dessa forma, a entrada dos dois sistemas de decisão Fuzzy chamada de *distância da tarefa atual* tem como variáveis linguísticas: *perto*, *médio* e *longe* (Figura 4 (a)). A segunda entrada, chamada de *distância da tarefa com falha*, serve para análise da distância que o robô tem da tarefa do robô que falhou. Também tem como variáveis linguísticas: *perto*, *médio* e *longe*, apresentadas na Figura 4 (b).

A terceira entrada dos dois sistemas de decisão Fuzzy é o *signal WiFi do robô*, que tem como variáveis linguísticas: *baixo*, *médio* e *alto* (Figura 4 (c)). A ARENA conta com dois roteadores sem fio dispostos em locais estratégicos do armazém a fim de ter uma ampla cobertura. Quanto mais próximo ao roteador, melhor será o sinal, sendo assim, o sinal será considerado *alto* se estiver entre -40dBm e 0dBm, *médio* se estiver entre -62dBm e -38dBm e *baixo* se estiver entre -100dBm e -60dBm.

A quarta entrada é para a informação do *tempo restante para necessidade de manutenção* que o robô tem, em minutos. As variáveis linguísticas para o tempo restante para necessidade de manutenção são: *pouco*, *médio* e *muito* (Figura 4 (d)). A última

entrada para o sistema de decisão Fuzzy é a informação do percentual de *bateria* do robô. Essa informação indica apenas a capacidade do robô, simplificando a descarga da bateria. As variáveis linguísticas também são: *pouco*, *médio* e *muito*. A entrada para a informação da bateria do robô é apresentada na Figura 4 (e). Por fim, a saída Fuzzy é o *grau de aptidão do robô* para realizar a substituição em outro grupo de processo. A saída Fuzzy é apresentada na Figura 4 (f), e tem como variáveis linguísticas: *baixo*, *médio* e *alto*.

O sistema de decisão Fuzzy para prioridades superiores e para prioridades inferiores contam com um conjunto de 243 regras cada um. A diferença entre eles é a forma como as regras são elaboradas. Para ambos, caso a variável linguística do percentual de bateria do robô for *pouco*, ou o tempo restante para manutenção do robô for *pouco* ou sinal WiFi for *baixo*, o resultado da regra será um grau de aptidão *baixo* para o robô.

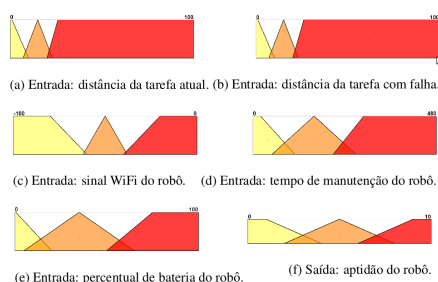


Figura 4. Entradas e saídas para o sistema de decisão Fuzzy.

Para o sistema de decisão Fuzzy para prioridades superiores, caso a distância da tarefa do robô que falhou seja *perto*, o resultado da regra será *alto*. Ou seja, ele irá dar uma nota melhor ao robô que mais rápido atenderá a tarefa com prioridade maior. Caso a distância da tarefa do robô que falhou seja *médio*, o resultado será *médio*. Por fim, se a distância for *longe*, o resultado será *baixo*, pois esse robô estará longe da tarefa do robô que falhou.

Para o sistema de decisão Fuzzy para prioridades inferiores, será priorizada a distância da tarefa atual do robô, ou seja, quanto mais longe ele estiver da tarefa atual, maior será a sua nota. Então se a distância da tarefa atual for *perto*, a saída da regra será *baixo*; se for *médio*, a saída será *médio*; se for *longe*, a saída será *alto*.

Dessa forma, ao final do processamento, cada robô deverá chegar à indicação de um robô para deixar o grupo. Como a decisão do grupo é consensual, um robô poderá indicar ele mesmo para deixar o grupo, se isso for o melhor para o processo que está cedendo o robô e para o processo que irá recebê-lo. Caso aconteça algum empate, se a tarefa que precisa ser atendida for de menor prioridade, o robô com maior distância para terminar a tarefa atual será cedido. Se a tarefa que precisa ser atendida for de maior prioridade, o robô com menor distância para a tarefa a ser atendida será cedido.

5.2. Avaliação experimental do CFRB

O CFRB teve sua avaliação realizada na ARENA e foi planejada com base em dois experimentos, ou seja, um utilizando o sistema de decisão Fuzzy para prioridades inferiores e outro para prioridades superiores.

5.2.1. Experimento 1: Decisão Consensual com Fuzzy para Prioridades Inferiores

O primeiro experimento é um exemplo onde um processo com maior prioridade cede um robô para um processo de prioridade menor. Isso acontece pois o processo com maior prioridade possui dois robôs a mais do que o necessário para a sua prioridade. Nesse experimento é utilizada a saída Fuzzy utilizando o sistema de decisão Fuzzy para prioridades inferiores. O primeiro experimento conta com três processos do tipo *Carga de Entrada*, conforme descrito na Tabela 1.

Tabela 1. Decisão consensual com Fuzzy para prioridades inferiores.

#	Tipo de Processo	Prioridade	Número de Caixas	Estado Inicial	Corredor do Armazém
Processo-1	<i>Carga de Entrada</i>	3	4	I1	4
Processo-2	<i>Carga de Entrada</i>	4	3	I2	2
Processo-3	<i>Carga de Entrada</i>	2	1	I3	1

A primeira cena do experimento 1 apresentada na Figura 5 apresenta os três processos sendo executados. O grupo de robôs do primeiro processo (robô 0-3) receberam a cor amarela e estão em direção ao estado I1 para pegar as caixas do setor de *Carga de Entrada* para o setor de *Verificação*. O grupo de robôs do segundo processo (robô 4-6) receberam a cor azul escuro e estão indo em direção ao estado I2, conforme indicado na Figura 5. Por fim, o robô 7 é o único robô do processo 3 com cor azul claro e está indo em direção ao estado I3.

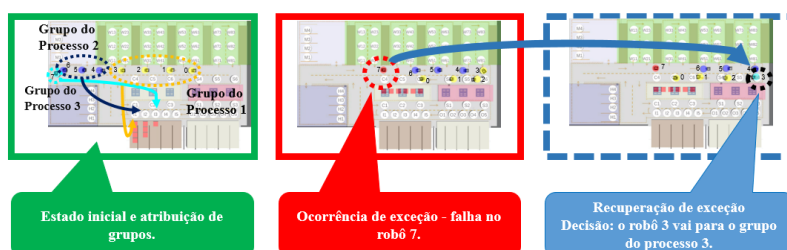


Figura 5. Decisão consensual com Fuzzy para prioridades inferiores.

A segunda cena do experimento 1 apresenta um momento mais adiantado do experimento, onde os robôs já carregaram as caixas para o setor de *Verificação* e estão indo em direção à saída do setor de *Verificação* para levar essas caixas para o *Armazém*. Porém, nesse momento, o robô 7 apresenta falha, passando a apresentar a cor vermelha. O escalonador então sinaliza que um processo de prioridade 2 requer um robô e determina o processo 2 como o gerente por ser o de maior prioridade entre os três processos. Essa ordem é então passada para o nível de negociação, conforme apresenta a Figura 6.

Entre os três processos, o único que possui robôs sobrando é o processo 1, com dois robôs extras. Então a decisão do gerente é que o processo 1 libere um robô para o processo de prioridade 2, tendo como gerente eleito o robô 3. Cada robô do processo 1 faz a sua análise para determinar qual o melhor robô para atender à falha do processo com prioridade 2. Como a prioridade do processo que sofreu falha é menor do que a prioridade do processo 1, os robôs do processo 1 utilizarão o sistema de decisão Fuzzy para prioridades inferiores. Nesse caso, o grupo não cederá o seu melhor robô para suprir a falta do processo com prioridade 2, mas o que estiver mais distante de encerrar o processo 1, de

acordo também com as demais características como distância da tarefa que o robô com falha estava executando, sinal WiFi do robô, tempo restante para a próxima manutenção e bateria do robô. Nesse caso, o robô escolhido por consenso para deixar o grupo do processo 1 é o robô 3, conforme detalhado na Figura 6. A substituição do robô 7 pelo robô 3 é apresentada na terceira cena da Figura 5, onde o robô 3 passa a ter a cor azul claro. Nesse instante, todos os robôs se direcionam para o setor de *Verificação* para carregar as caixas ao *Armazém* para finalizar os processos.

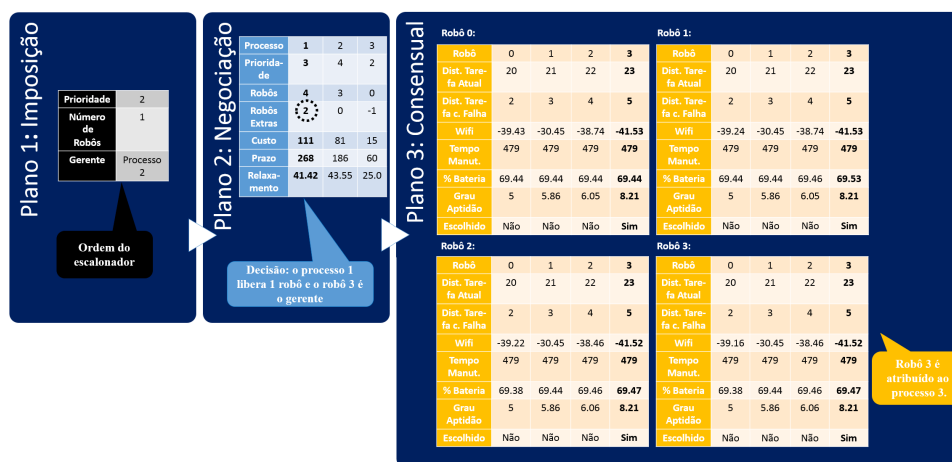


Figura 6. Decisões ternário-hierárquicas do experimento 1.

5.2.2. Experimento 2: Decisão Consensual com Fuzzy para Prioridades Superiores

O segundo experimento apresenta uma situação onde um processo com prioridade menor precisa ceder um robô para um processo com prioridade maior. Ao contrário do experimento 1, no experimento 2 é utilizada a saída Fuzzy utilizando o sistema de decisão Fuzzy para prioridades superiores. Para o experimento 2 é assumido que há duas caixas no corredor 1, quatro caixas no corredor 3 e duas caixas no corredor 4, carregadas no *Armazém* pelos processos 1, 2 e 3, executados anteriormente. O experimento 2 conta com dois processos do tipo *Carga de Saída* e um processo do tipo *Carga de Entrada*, conforme apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Decisão consensual com Fuzzy para prioridades superiores.

#	Tipo de Processo	Prioridade	Número de Caixas	Estado Inicial	Corredor do Armazém
Processo-4	<i>Carga de Saída</i>	4	2	O1	4
Processo-5	<i>Carga de Saída</i>	2	2	O2	1
Processo-6	<i>Carga de Entrada</i>	4	4	I4	1

O primeiro cenário do experimento 2, apresentado na Figura 7, mostra para onde cada grupo de processo está se dirigindo. Os robôs 0 e 1, do processo 4, possuem cor amarelo. Esses robôs estão retirando duas caixas do corredor 4 do *Armazém* para levar ao setor de *Expedição*. Os robôs 2 e 3, do processo 5, possuem cor azul escuro e estão retirando duas caixas do corredor 1 do *Armazém* para levar até o setor de *Expedição*. Por último, os robôs 4, 5, 6 e 7, de cor azul claro, são os robôs do processo 6 e vão se dirigir até o estado I4 do setor de *Carga de Entrada*.

Após os robôs dos processos 4 e 5 entregarem suas caixas no setor de *Expedição*, eles se dirigem para a saída desse mesmo setor para retirar as caixas para levar ao setor de

Carga de Saída. Porém, como mostra o segundo cenário da Figura 7, o robô 1 apresenta falha e é iniciado o processo de resiliência à falha. O escalonador determina que um processo de prioridade 4 falhou e precisa de um robô, sendo o gerente o processo 4 por ser o de maior prioridade e mais antigo, conforme mostra a Figura 8.

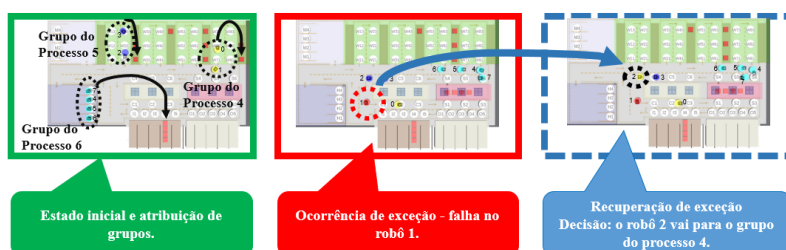


Figura 7. Decisão consensual com Fuzzy para prioridades superiores.

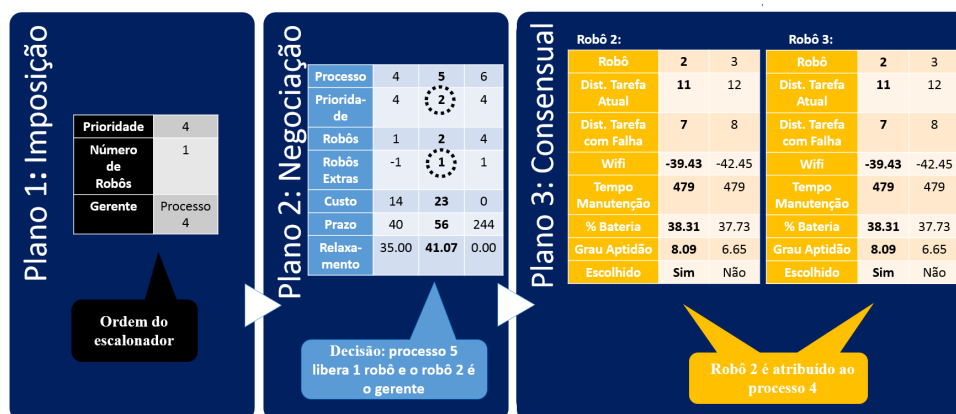


Figura 8. Decisões ternário-hierárquicas do experimento 2.

No plano de negociação, entre os três processos, o que atende à necessidade é o processo 5 por ter um robô extra e por ter menor prioridade que o processo 6. O gerente determina que o processo 5 deve liberar um robô de seu grupo, tendo o robô 2 como gerente eleito. No plano consensual, cada robô do processo 5 faz a sua análise para determinar qual o melhor robô para atender à falha do processo com prioridade 4. Como a prioridade do processo que sofreu falha é maior do que a prioridade do processo 5, os robôs do processo 5 utilizarão o sistema de decisão Fuzzy para prioridades superiores. Nesse caso, o grupo irá ceder o robô que se encontra mais próximo da tarefa do robô que falhou, além de analisar também as demais características como distância da tarefa corrente, sinal WiFi do robô, tempo restante para a próxima manutenção e bateria do robô. Nesse caso, o robô escolhido por decisão consensual para deixar o grupo do processo 5 foi o robô 2, conforme detalhado na Figura 8. Por fim, o terceiro cenário da Figura 7 mostra o momento em que o robô 2 deixa o grupo do processo 5 e passa a fazer parte do grupo do processo 4, alterando sua cor para amarelo.

5.3. Comparativo

Essa seção visa uma comparação entre as abordagens propostas por [Hoenig et al. 2018] e [Das et al. 2015] com a abordagem CFRB, apresentada nessa tese. Esses métodos foram escolhidos para comparação porque têm código disponível para avaliação e são fáceis de se adaptar ao cenário de armazém da ARENA.

[Hoenig et al. 2018] propõem uma alocação de processos com caminhos livres de colisão, baseado no algoritmo *Conflict-Based Search* (CBS), denominada *Conflict-Based Search with Optimal Task Assignment* (CBS-TA). Nesse caso, a abordagem CBS-TA estende o CBS para também atribuir tarefas. Além disso, [Hoenig et al. 2018] propõem duas abordagens denominadas *Enhanced Conflict-Based Search* (ECBS) e *Enhanced Conflict-Based Search with Optimal Task Assignment* (ECBS-TA) que são, respectivamente, uma solução de trajetórias de caminhos inspirada no CBS e uma extensão do ECBS que inclui atribuir tarefas. Por fim, [Hoenig et al. 2018] apresentam uma solução denominada *Safe Interval Path Planning* (SIPP), uma solução que também visa uma configuração de caminho livre de colisões. Essas soluções não abordam a resiliência à falha.

Já a abordagem *Consensus Based Parallel Auction and Execution* (CBPAE), de [Das et al. 2015], é voltada para alocação de processos em um sistema de múltiplos robôs autônomos heterogêneos implantados em uma instituição de saúde, com base nos princípios de leilão e consenso. Essa abordagem também não aborda a resiliência à falha.

A fim de estabelecer um comparativo os trabalhos de [Hoenig et al. 2018] e [Das et al. 2015], foram consideradas duas funções objetivo frequentemente utilizadas na literatura:

- a somatória das distâncias de caminho de todos os robôs: a soma de todas as transições na máquina de estados do armazém. A máquina de estados do armazém contém as transições entre os estados que representam a direção em que os robôs podem percorrer, evitando colisões entre eles;
- distância de tarefa mais longa: a maior distância percorrida entre todos os robôs, durante a realização de uma tarefa.

O cenário de armazém dessa tese foi adaptado e utilizado para as abordagens de [Hoenig et al. 2018] e [Das et al. 2015]. Os experimentos foram realizados para os processos de *Carga de Entrada* e *Carga de Saída*, onde cada processo possuía quatro caixas para transportar. O comparativo teve um total de 21 experimentos para o processo *Carga de Entrada* e 21 experimentos para o processo *Carga de Saída*.

Resumidamente, a melhoria média do CFRB em comparação aos demais métodos foi de -20,43% em relação à *somatória de distâncias de caminho* dos robôs e de -19,09% em relação à *distância de tarefa mais longa*, conforme apresentado na Tabela 3.

Tabela 3. Resumo da comparação do CFRB com métodos semelhantes.

	SOMATÓRIA DE DISTÂNCIAS DE CAMINHO						
	CFRB	ECBS	ECBS-TA	CBS	CBS-TA	PP SIPP	CBPAE
Média da Somatória de Distâncias - Carga de Entrada	64,33	+25,39%	+41,45%	+25,39%	+25,39%	+25,39%	+21,76%
Média da Somatória de Distâncias - Carga de Saída	46,00	+21,74%	+26,09%	+21,74%	+26,09%	+21,74%	+21,74%
Média de Ambos os Processos	55,17	+23,87%	+35,05%	+23,87%	+25,68%	+23,87%	+21,75%
DISTÂNCIA DE TAREFA MAIS LONGA							
Média da Distância de Tarefa mais Longa - Carga de Entrada	17,00	+23,53%	+37,25%	+23,53%	+23,53%	+23,53%	+21,57%
Média da Distância de Tarefa mais Longa - Carga de Saída	12,67	+18,42%	+26,32%	+18,42%	+26,32%	+18,42%	+18,42%
Média de Ambos os Processos	14,83	+21,35%	+32,58%	+21,35%	+24,72%	+21,35%	+20,22%
MELHORIA MÉDIA DO CFRB							
Somatória de Distâncias	-20,43%						
Distância de Tarefa mais Longa	-19,09%						

A Figura 9 mostra a média da *somatória de distâncias de caminho* dos robôs e a média da *distância de tarefa mais longa* obtidas pela comparação dos métodos CFRB, ECBS, ECBS-TA, CBS, CBS-TA, Planejamento Priorizado usando SIPP e CBPAE. Em todas as situações apresentadas, o método CFRB apresentou a menor média.

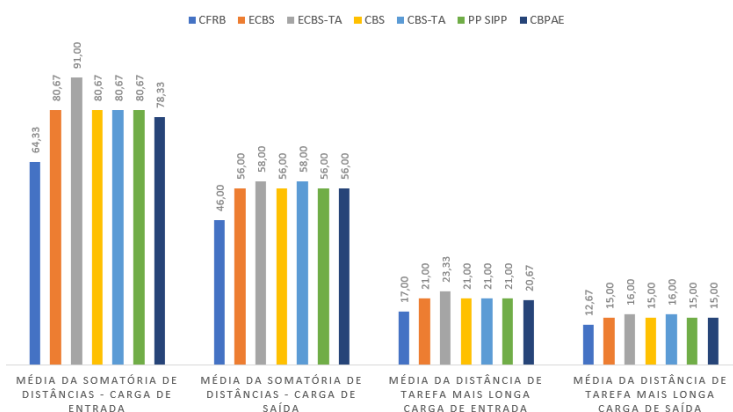


Figura 9. Análise gráfica da comparação do CFRB com métodos similares.

6. Considerações Finais

Essa tese apresentou uma nova abordagem resiliente à falha baseada em decisões consensuais para tratar o problema de alocação de processos para sistemas multirrobôs. A abordagem denominada *Consensual Fault-Resilient Behaviour* é baseada nas duas abordagens prévias também apresentadas nessa tese: abordagem de Escalonamento Preemptivo de Processos para Sistemas Multirrobôs com Resiliência à Falha [Kalempa et al. 2021a] e abordagem de Comportamento Ternário-Hierárquico Coletivo Resiliente à Falha [Kalempa et al. 2020a]. As abordagens prévias desprezavam características importantes dos robôs no momento de tratar a substituição de um robô com falhas. Além de considerar essas características essenciais, a abordagem CFRB também considera o que é mais benéfico para o coletivo do que para cada robô.

Uma das principais contribuições dessa tese foi gerar soluções para gerenciamento de vários processos em um armazém automatizado com empilhadeiras autônomas, representadas nesse trabalho pelos robôs WsBots [Limeira et al. 2019], melhorando o seu desempenho e disponibilidade e apresentando um comportamento resiliente à falha.

Como trabalhos futuros, pretende-se trabalhar com mais robôs e em mais cenários da fábrica de inspiração real. Além disso, pode-se expandir o MRS para trabalhar com robôs heterogêneos, levando em consideração suas diferentes capacidades no momento da alocação de processos. Assim, poderia ser verificado se um MRS com rica diversidade é mais eficiente.

Referências

- Das, G. P., Mcginnity, T. M., Coleman, S. A., and Behera, L. (2015). A Distributed Task Allocation Algorithm for a Multi-Robot System in Healthcare Facilities. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 80(1):33–58.
- Gerkey, B. P. and Mataric, M. J. (2004). A formal analysis and taxonomy of task allocation in multi-robot systems. *The International Journal of Robotics Research*, 23(9):939–954.
- Hoenig, W., Kiesel, S., Tinka, A., Durham, J., and Ayanian, N. (2018). Conflict-based search with optimal task assignment. *Proceedings of the International Joint Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems*.

- Kalempa, V. C., Piardi, L., Limeira, M., and De Oliveira, A. S. (2020a). Fault-resilient collective ternary-hierarchical behavior to smart factories. *IEEE Access*, 8:176905–176915.
- Kalempa, V. C., Piardi, L., Limeira, M., and de Oliveira, A. S. (2021a). Multi-robot preemptive task scheduling with fault recovery: A novel approach to automatic logistics of smart factories. *Sensors*, 21(19).
- Kalempa, V. C., Simões Teixeira, M. A., de Oliveira, A. S., and Fabro, J. A. (2021b). *Agile Experimentation of Robot Swarms in Large Scale*, pages 77–123. Springer International Publishing, Cham.
- Kalempa, V. C., Teixeira, M. A. S., and de Oliveira, A. S. (2020b). Versatile and massive experimentation of robot swarms in industrial scenarios. In Silva, M. F., Luís Lima, J., Reis, L. P., Sanfeliu, A., and Tardioli, D., editors, *Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, pages 279–290, Cham. Springer International Publishing.
- Kalempa, V. C., Teixeira, M. A. S., de Oliveira, A. S., and Fabro, J. A. (2018). Intelligent dynamic formation of the multi-robot systems to cleaning tasks in unstructured environments and with a single perception system. In *2018 Latin American Robotic Symposium, 2018 Brazilian Symposium on Robotics (SBR) and 2018 Workshop on Robotics in Education (WRE)*, pages 71–76, Joao Pessoa, Brazil. IEEE.
- Khamis, A., Hussein, A., and Elmogy, A. (2015). *Multi-robot Task Allocation: A Review of the State-of-the-Art*, pages 31–51. Springer International Publishing, Cham.
- Limeira, M., Piardi, L., Cremer Kalempa, V., Schneider, A., and Leitão, P. (2020). Augmented reality system for multi-robot experimentation in warehouse logistics. In Silva, M. F., Luís Lima, J., Reis, L. P., Sanfeliu, A., and Tardioli, D., editors, *Robot 2019: Fourth Iberian Robotics Conference*, pages 319–330, Cham. Springer International Publishing.
- Limeira, M., Piardi, L., Kalempa, V. C., de Oliveira, A. S., and Leitão, P. (2019). Wsbot: A tiny, low-cost swarm robot for experimentation on industry 4.0. *Robotics Symposium and Latin American Robotics Symposium (SBR-LARS), 2019 Brazil*.
- Limeira, M., Piardi, L., Kalempa, V. C., Leitão, P., and de Oliveira, A. S. (2021). Depthlidar: Active segmentation of environment depth map into mobile sensors. *IEEE Sensors Journal*, 21(17):19047–19057.
- Ongaro, D. and Ousterhout, J. (2014). In search of an understandable consensus algorithm. In *2014 USENIX Annual Technical Conference USENIX ATC' 14*, pages 305–319.
- Passino, K. M., Yurkovich, S., and Reinfank, M. (1998). *Fuzzy control*, volume 42. Addison-wesley Reading, Boston.
- Piardi, L., Kalempa, V. C., Limeira, M., de Oliveira, A. S., and Leitão, P. (2019). Arena - augmented reality to enhanced experimentation in smart warehouses. *Sensors*, 19(19).
- Yogeswaran, M. and Ponnambalam, S. G. (2010). Swarm robotics: An extensive research review. *Advanced Knowledge Application in Practice, Igor Fuerstner (Ed.), InTech*.