



**UFOP**

Universidade Federal  
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Computação e Sistemas**

**Computação evolucionária aplicada ao  
Problema de Geração de Escala de  
Enfermeiros**

**Aline Marina Lopes**

**TRABALHO DE  
CONCLUSÃO DE CURSO**

ORIENTAÇÃO:

Prof. Fernando Bernardes de Oliveira

COORIENTAÇÃO:

Prof. George Henrique Godim da Fonseca

**Julho, 2018**

**João Monlevade–MG**

**Aline Marina Lopes**

**Computação evolucionária aplicada ao  
Problema de Geração de Escala de Enfermeiros**

Orientador: Prof. Fernando Bernardes de Oliveira

Coorientador: Prof. George Henrique Godim da Fonseca

Monografia apresentada ao curso de Sistemas de Informação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para aprovação na Disciplina “Trabalho de Conclusão de Curso II”.

**Universidade Federal de Ouro Preto**

**João Monlevade**

**Julho de 2018**

L864c

Lopes, Aline Marina.

Computação evolucionária aplicada ao problema de geração de escala de enfermeiros [manuscrito] / Aline Marina Lopes. - 2018.

56f.: il.: grafs; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Bernardes Oliveira.

Coorientador: Prof. Dr. George Henrique Godim Fonseca.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Departamento de Computação e Sistemas de Informação.

1. Sistemas de informação. 2. Escala de trabalho. 3. Algoritmos genéticos. I. Oliveira, Fernando Bernardes. II. Fonseca, George Henrique Godim. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU: 004.41

Catálogo: [ficha.sisbin@ufop.edu.br](mailto:ficha.sisbin@ufop.edu.br)

# FOLHA DE APROVAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA

## Computação evolucionária aplicada ao Problema de Geração de Escala de Enfermeiros

**Aline Marina Lopes**

Monografia apresentada ao Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial da disciplina CSI499 – Trabalho de Conclusão de Curso II do curso de Bacharelado em Sistemas de Informação e aprovada pela Banca Examinadora abaixo assinada:



---

Prof. Fernando Bernardes de Oliveira  
Doutor  
DECSI – UFOP



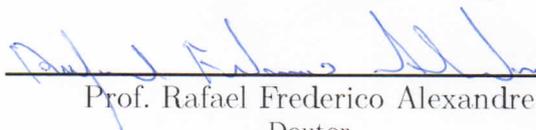
---

Prof. George Henrique Godim da Fonseca  
Doutor  
DECSI – UFOP



---

Profa. Tatiana Alves Costa  
Doutora  
Examinador  
DECSI – UFOP



---

Prof. Rafael Frederico Alexandre  
Doutor  
Examinador  
DECSI – UFOP

João Monlevade, 17 de julho de 2018

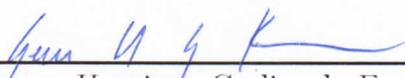
## ATA DE DEFESA

No dia 17 do mês de Julho de 2018, às 15:00 horas, na sala C304 do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, foi realizada a defesa de Monografia pelo(a) aluno(a) **Aline Marina Lopes**, sendo a Comissão Examinadora constituída pelos professores: Prof. Fernando Bernardes de Oliveira, Prof. George Henrique Godim da Fonseca, Profa. Tatiana Alves Costa, Prof. Rafael Frederico Alexandre. O(a) candidato(a) apresentou a monografia intitulada: "**Computação evolucionária aplicada ao Problema de Geração de Escala de Enfermeiros**". A comissão examinadora deliberou, por unanimidade, pela aprovação do candidato, com nota 7,0 (Notre Boas), concedendo-lhe o prazo de 15 dias para incorporação das alterações sugeridas ao texto final. Na forma regulamentar, foi lavrada a presente ata que é assinada pelos membros da Comissão Examinadora e pelo(a) graduando(a).



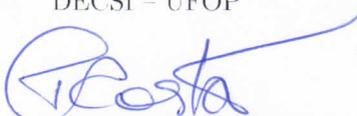
Prof. Fernando Bernardes de Oliveira

Doutor  
DECSI - UFOP



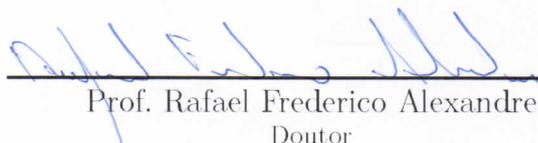
Prof. George Henrique Godim da Fonseca

Doutor  
DECSI - UFOP



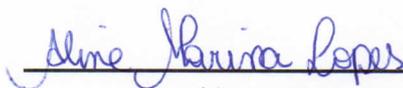
Profa. Tatiana Alves Costa

Doutora  
Examinador(a)  
DECSI - UFOP



Prof. Rafael Frederico Alexandre

Doutor  
Examinador(a)  
DECSI - UFOP



Aline Marina Lopes

*Este trabalho é dedicado à Deus, que me deu a oportunidade, a força, a fé, a perseverança e a esperança para concluir mais um sonho.*

# Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Trindade Santa, que me permitiu alcançar mais um sonho, erguendo-me em momentos que pensei que não teria força. Agradeço aos enormes anjos que Deus me enviou, ao qual os chamo de pai(Aníbio) e mãe(Lúcia), que sempre vibraram com as minhas conquistas, mas principalmente me incentivaram, ajudaram, empurraram e me ampararam nos momentos mais difíceis. Vocês são com toda a certeza os melhores pais do mundo.

Agradeço também ao meu super namorado Cleber, que escutou todas as minhas comemorações, angústias e choros desses 4 anos, por ter compreendido minha ausência e acreditado na minha capacidade. Ao meus irmãos maravilhosos Rafael e Poia(Amanda) por terem me feito rir quando eu achei que não fosse capaz de ao menos secar minhas lágrimas e por fingirem que me acham inteligente. Meu Deus vocês são incríveis!

Aos meus amores Jucelia, Kamylla e Gleice, a qual chamo de família, por serem a melhor família para se estar quando se está longe, obrigada por cada momento de risada, desespero, luta contra "kalangos" gigantes e baratas mutantes e principalmente pelo companheirismo, que permitiu nunca me sentir totalmente sozinha, pois uma parte da minha família estava nos quartos ao lado. E falando em teto, Edivânia, Marcelo e tia Aparecida, obrigado por terem me ajudado no momento mais assustador, a reviravolta na minha realidade, vocês a tornaram bem mais leve de se adaptar.

Aos meus amigos da 'salinha', vocês foram os melhores seres que conheci nessa faculdade, apesar de serem os mais estranhos são os mais companheiros que eu poderia ter a honra de conhecer, Deus providenciou tudo de forma tão perfeita que ele colocou cada um de vocês bem pertinho de mim, sem vocês eu não estaria formando agora, afirmo com toda a certeza. Aos meus amigos de BH, MonleCity e Visão Jr, saibam que todos vocês tem a capacidade de mudar o mundo para melhor, porque vocês mudaram o meu mundo para melhor.

Ah e um enorme obrigado para a melhor família do universo, a minha, por terem rezado tanto por mim, saibam que a oração de vocês me deu força para seguir em frente em todos os momentos em que pensei que iria desabar, e sei que não desabei porque vocês estavam me sustentando com vossas orações.

Meus orientadores papais, Fernando e George, obrigada por serem tão alto astral e companheiros, não poderia ter escolhido profissionais e pessoas melhores para me ajudarem a finalizar esse passo com chave de ouro.

OBRIGADA à todos vocês por fazerem parte da minha vida!

*“Não pretendo dizer que já alcancei(esta meta) e que cheguei a perfeição. Não. Mas eu me empenho em conquistá-la, uma vez que também eu fui conquistado por Jesus Cristo.”*

— A Bíblia (Fp. 3:12)

# Resumo

A geração de escalas para enfermeiros nas instituições de saúde é uma tarefa complexa e de difícil solução, devido a existência de diversas restrições que necessitam ser atendidas. Na literatura, o escalonamento de enfermeiros é uma variação do problema de agendamento de horários (*timetabling*), conhecida como *Nurse Rostering Problem*. As especificações do problema são definidas pela primeira *Internacional Nurse Rostering Competition* (INRC). O método implementado no trabalho aplica técnicas de Computação Evolucionária baseada em estratégia evolutiva, que tem vinculado à sua estrutura a estratégia de busca local *Late Acceptance Hill Climbing*, como modo de varrer o espaço de busca a procura de soluções mais eficientes. Os indivíduos da população são submetidos ao operador de mutação e são sujeitos a busca local somente se estiverem dentro da probabilidade de ocorrência. Através dos experimentos computacionais realizados foi possível observar que a estratégia evolutiva adotada foi efetiva para refinar as soluções iniciais. Quando comparado com o estado da arte da literatura, o método desenvolvido obteve um desempenho inferior. Contudo, o método é capaz de gerar soluções iniciais factíveis e com operadores que possuem a capacidade de garantir a factibilidade da solução durante todo o processo, além de ser capaz de refinar o custo da solução ao longo das gerações. O método desenvolvido no trabalho emprega o cálculo correto da função de avaliação do custo da solução.

**Palavras-chaves:** Problema de Agendamento de Enfermeiros. Computação Evolucionária. Algoritmos Genéticos. *Late Acceptance Hill Climbing*. Competição Internacional de Escalonamento de Enfermeiros.

# Abstract

The generation of work schedule for nurses in health institutions is a complex task and hard to solve due to a large variety of skills. In literature, nurse's scheduling is a variation of timetabling, known as Nurse Rostering Problem. The specifications of the problem are defined by the first International Nurse Rostering Competition (INRC). The method implemented in the work applies Evolutionary Computation techniques based on evolutionary strategy, which has linked its structure to the local search strategy Late Acceptance Hill Climbing, as a means of improving results. The method submits individuals of the population to the mutation operator and they are subject to local search only if they are within the probability of occurrence. Through the computational experiments it was possible to observe that the adopted evolutionary strategy was effective to refine the initial solutions. When compared to the state of the art literature, the developed method performed less. However, the method is capable of generating feasible initial solutions with operators that have the ability to guarantee the feasibility of the solution throughout the process, as well as being able to refine the cost of the solution over the generations. The method developed in the work employs the correct calculation of the function of evaluation of the cost of the solution.

**Key-words:** Nurse Rostering Problem. Evolutionary Computation. Genetics Algorithms. Late Acceptance Hill Climbing. International Nurse Rostering Problem.

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Cromossomo . . . . .	21
Figura 2 – Tipos de Turno . . . . .	26
Figura 3 – Exemplo de Escala . . . . .	26
Figura 4 – Algoritmo . . . . .	32
Figura 5 – Representação da Solução . . . . .	36
Figura 6 – Late Acceptance Hill Climbing . . . . .	38
Figura 7 – Parâmetros Definidos . . . . .	42
Figura 8 – Parâmetros Finais . . . . .	43
Figura 9 – Refinamento do Custo com a Busca Local - Solução Inicial . . . . .	46
Figura 10 – Refinamento do Custo com a Busca Local . . . . .	47
Figura 11 – Gráfico de refinamento da solução ao longo das gerações . . . . .	48
Figura 12 – Gráfico de refinamento da solução ao longo das gerações . . . . .	49

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Resultados Parametrização . . . . .	43
Tabela 2 – Instâncias Seleccionadas . . . . .	44
Tabela 3 – Análise dos Custos (BILGIN et al., 2010)/EE_LAHC . . . . .	45
Tabela 4 – Análise dos Custos INRC/EE_LAHC . . . . .	45

# Lista de abreviaturas e siglas

CE	Computação Evolucionária
CGA	<i>Cooperative Genetic Algorithms</i>
CODES	<i>Combinatorial Optimisation and Decision Support</i>
COSI	Colegiado de Sistemas de Informação
DECSI	Departamento de Computação e Sistemas
DP	Desvio Padrão
EE	Estratégias Evolutivas
GLPK	<i>GNU Linear Programming Kit</i>
HC	<i>Hill Climbing</i>
ICEA	Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
INRC	<i>International Nurse Rostering Competition</i>
JM	João Monlevade
LA	<i>Late Acceptance</i>
LAHC	<i>Late Acceptance Hill Climbing</i>
NSP	<i>Nurse Scheduling Problem</i>
SI	Sistemas de Informação
SINTEF	<i>Stiftelsen for industriell og teknisk forskning</i>
UFOP	Universidade Federal de Ouro Preto
UPA	Unidades de Pronto Atendimento
PAEE	Problema de Agendamento de Escalas de Enfermeiros
PEE	Problema de Escalonamento de Enfermeiros
PLI	Programação Linear Inteira
PSF	Programa de Saúde da Família

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>14</b>
1.1	O problema	15
1.2	Objetivos	15
1.3	Metodologia	16
1.4	Organização do trabalho	16
<b>2</b>	<b>PROBLEMA</b>	<b>18</b>
2.1	Agendamento de horários	18
2.2	O Problema de Escalonamento de Enfermeiros	19
2.3	Revisão bibliográfica	21
2.4	Descrição do problema abordado	24
2.4.1	<i>International Nurse Rostering Competition</i>	25
2.4.2	Restrições	27
2.4.3	Função objetivo	29
2.5	Considerações gerais	30
<b>3</b>	<b>IMPLEMENTAÇÃO</b>	<b>31</b>
3.1	Estratégia Evolutiva	31
3.1.1	Geração de solução inicial	34
3.1.2	Operador de mutação	36
3.1.3	<i>Late Acceptance Hill Climbing</i>	37
3.2	Considerações gerais	39
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>41</b>
4.1	Parâmetros e estrutura de testes	41
4.2	Análise dos resultados computacionais	44
4.3	Discussão dos resultados	50
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
5.1	Trabalhos futuros	52
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>53</b>

# 1 Introdução

Este trabalho propõem o estudo e aplicação de técnicas de computação evolucionária para solucionar o problema de agendamento de horários (*timetabling*) em um determinado contexto. O problema de *Timetabling* dedica-se à alocação de horários para distintos contextos, como horários de aula em instituições, escalonamento de transporte público, escalonamento de funcionários na área da saúde, entre outras. O contexto específico que adota este trabalho é o Problema de Escalonamento de Enfermeiros (*Nurse Rostering Problem*).

O Problema de Agendamento de Escalas de Enfermeiros vem ganhando atenção nos últimos anos, visto que planejar a escala de dezenas de enfermeiros levando em consideração suas restrições contratuais e preferências não é uma tarefa trivial. Em geral, os hospitais adotam o regime de funcionamento de 24 horas diárias, e a realização da tarefa de escalonamento requer o uso de um recurso muito importante, o tempo, visto que este problema necessita relacionar e respeitar diversas restrições envolvidas que podem ser provenientes da instituição hospitalar, legislação vigente e/ou dos funcionários.

Petrovic e Berghe (2008) destacam que o problema de escalonamento se tornou muito interessante no campo da pesquisa operacional e inteligência artificial, em consequência de se encaixar na classe de problemas  $\mathcal{NP}$ -Difícil, principalmente a partir da década de 1990. Ressaltam ainda que os modelos desenvolvidos nos trabalhos não são evoluídos para uma modo mais completo, na qual se dá continuidade aos trabalhos anteriores. A realidade mencionada anteriormente ocasiona o aumento na dificuldade de implementação de um modelo único para resolução de qualquer problema, mesmo que sejam semelhantes. O aumento da ocorrência de trabalhos cada vez mais particulares, com restrições e função objetivo mais específicas, torna a comparação com trabalhos anteriores quase impossível.

Boaventura, Pinto e Yamanaka (2013) apresentam diversas técnicas que podem ser abordadas na resolução desse problema. As principais técnicas utilizadas são Algoritmo Genético (JAN; YAMAMOTO; OHUCHI, 2000), *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure* (GRASP) (GOODMAN; DOWSLAND; THOMPSON, 2009), Busca Tabu (DOWSLAND, 1998), Programação Inteira (SANTOS et al., 2012) e (VALOUXIS et al., 2012), dentre outras.

A geração de escalas na área da saúde constitui-se na determinação de uma escala que possa assistir as necessidades do hospital e dos funcionários. Tal escala deve atender de forma suficientemente adequada as determinações impostas no contrato de trabalho de cada funcionário, bem como a demanda mínima de pessoal exigida por turno no hospital. Priorizadas as restrições fortes sobre questões contratuais e de demanda do hospital,

o modelo proposto nesse trabalho objetiva a satisfazer o máximo de restrições fracas concebíveis.

Diante disso, o objetivo principal deste trabalho é realizar estudos sobre os métodos de computação evolucionária aplicáveis ao contexto, e adequá-los às características do problema de escalonamento de enfermeiros. O problema abordado é o de Problema de Agendamento de Escalas de Enfermeiros, discutido neste trabalho, no que tange ao escalonamento, jornadas de trabalho adotados, distribuição de turnos, assim como outras restrições impostas. Todavia, características próprias foram observadas, como quantidade mínima de profissionais exigidos por turno, padrões indesejados de turnos e folgas, tipos de turno vigentes, particularidades que são definidas nos contratos de trabalho. Estas características serão abordadas na modelagem do problema tratado.

O algoritmo que será apresentado nesse trabalho utiliza técnicas de computação evolucionária baseadas em estratégia evolutiva e emprega a meta-heurística *Late Acceptance Hill Climbing* como estratégia de busca local para a solução. A proposta é desenvolver uma abordagem com a aplicação das técnicas citadas e verificar se é possível encontrar soluções de boa qualidade para o problema de geração de horários para enfermeiros.

## 1.1 O problema

Em unidades de saúde que operam durante 24 horas por dia é normal o uso de escalas baseadas em turnos. Quando o número de enfermeiros é elevado, a produção de suas escalas de trabalho se torna uma tarefa pouco trivial, devido à existência de diversas restrições que devem ser atendidas. As restrições podem ser solicitações dos funcionários e/ou regras determinadas pela unidade de saúde e pela legislação vigente. Segundo Poltosi (2007a), a complexidade fundamenta-se nas variáveis e restrições envolvidas que devem ser atendidas na geração das escalas, enquadrando-se na classe de problemas de otimização  $\mathcal{NP}$ -difícil. Aquele autor aponta também que, a falta de ferramentas computacionais que auxiliem na geração de escalas de trabalho no segmento de enfermagem, com um tempo computacional aceitável, induz as unidades de saúde a optarem pela realização da tarefa de forma manual. De acordo com Santos (2006), esse tipo de problema na literatura é definido como “*Nurse Rostering Problem*” ou “*Nurse Scheduling Problem*”.

## 1.2 Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver técnicas baseadas em computação evolucionária e estratégias de busca local para a geração de escalas de horários de enfermeiros considerando as restrições definidas pelas instâncias de teste utilizadas. Como objetivos específicos deste trabalho pode-se citar:

1. Modelar e implementar uma estratégia baseada em Computação Evolucionária para a geração de escala enfermeiros.
2. Estudar mecanismos de busca local para o problema.
3. Validar o algoritmo proposto por meio de experimentos computacionais utilizando instâncias de teste disponíveis na literatura.

### 1.3 Metodologia

O método de pesquisa deste trabalho é o estudo de problemas de otimização, apoiando-se em técnicas e estratégias utilizadas na literatura para resolução dessa classe de problemas. Com finalidade de aplicar a teoria, é elaborada uma abordagem que utiliza técnicas consolidadas na área de otimização a fim de construir soluções viáveis para o problema de agendamento de enfermeiros. Os passos para execução desse trabalho são assim definidos:

1. Revisar a literatura sobre *timetabling* e suas classes, trabalhos correlatos da literatura e demais conceitos, bem como identificar métodos e técnicas utilizadas na solução deste tipo de problema.
2. Estudar métodos para representação do problema identificando abordagens e estruturas de dados específicos.
3. Definir e implementar uma meta-heurística para o problema baseado em métodos da computação evolucionária.
4. Estudar e incorporar mecanismos de busca local aplicados ao tipo do problema.
5. Planejar e realizar experimentos para avaliar a meta-heurística proposta, como performance, soluções obtidas, entre outras.
6. Analisar e discutir os resultados obtidos, além de identificar possíveis melhorias e considerações gerais sobre o processo.

### 1.4 Organização do trabalho

O restante dessa monografia é organizado como se segue: O [Capítulo 2](#) apresenta o Problema do Agendamento de Escalas de Enfermeiros e os principais trabalhos que são relevantes ao contexto da dissertação, tal como suas características, abordagens, técnicas empregadas e resultados. Para uma melhor compreensão sobre o problema tratado, o capítulo aborda inclusive sobre as instâncias utilizadas, tal como a justificativa para

---

adoção de instâncias da literatura e suas características. A implementação da heurística é elucidada no [Capítulo 3](#). Com o intuito de validar o algoritmo são realizados experimentos que possibilitam análises e geração de resultados que são encontrados no [Capítulo 4](#). Por fim, uma discussão final sobre a dissertação com intuito de avaliar o trabalho e propor melhorias são explanadas no [Capítulo 5](#).

## 2 Problema

Neste capítulo serão apresentados os principais conceitos que abrangem o Escalonamento de Enfermeiros. O problema de agendamento de horários é explicado na [Seção 2.1](#) e dentre as vertentes existentes, encontra-se o conceito de escalonamento de enfermeiros no âmbito hospitalar, que é o abordado na [Seção 2.2](#). O objetivo deste capítulo é fornecer conhecimento sobre o problema de otimização envolto na programação para enfermeiros, caracterizando sobre suas particularidades e definições. Um entendimento melhor sobre a contribuição da literatura para novas ideias em direção a resolução do problema, vem com a apresentação de trabalhos correlatados na [Seção 2.3](#). Com o propósito de contextualizar melhor sobre o problema tratado nesta monografia a [Seção 2.4](#) aborda as características das instâncias utilizadas e definições cruciais para compreensão do trabalho.

### 2.1 Agendamento de horários

O problema de otimização a ser tratado neste trabalho é conhecido como *Timetabling*. Este problema dedica-se à alocação de horários para distintos contextos como horários de aula em instituições ([KRIPKA; KRIPKA; SILVA, 2011](#)), escalonamento de transporte público ([RIBEIRO et al., 2014](#)), área da saúde debatido por ([FOURATI; JERBI; KAMMOUN, 2016](#)), entre outros diversos contextos.

[Müller e Barták \(2002\)](#) mencionam que o *timetabling* pode ser visto como um modo de agendamento de horários, em que se aloca recursos respeitando algumas restrições. Um problema que apresenta copiosas restrições e grandes números de variáveis, que necessitam ser atendidas ao obter-se uma solução ótima. Essas restrições podem ser restrições fortes ou fracas ([GOMES, 2012](#)). Desse modo, o problema se caracteriza também pela limitação do período de tempo, e os seus recursos não podem ser concebidos para dois ou mais eventos simultaneamente. Logo as variações comuns consumam a caracterização do problema por condição fixa e restrições que variam.

De acordo com [Kuleuven \(2010\)](#), o Problema de Agendamento de Escalas de Enfermeiros (PAEE) vem ganhando atenção nos últimos anos, uma vez que, gradativamente, o surgimento de estratégias podem melhorar o aproveitamento dos recursos disponíveis. Nas instituições hospitalares a produção de soluções viáveis e de alta qualidade requer um esforço intenso.

## 2.2 O Problema de Escalonamento de Enfermeiros

O escalonamento de enfermeiros é um problema complexo que trata a escala de trabalho dos funcionários e afeta diretamente o funcionamento das instituições de saúde. Em unidades de saúde que adotam o regime de funcionamento de 24 horas diárias é normal o uso de escalas baseadas em turnos. Ao elevar o número de enfermeiros, a produção de suas escalas de trabalho torna-se uma tarefa pouco trivial, devido a necessidade de corresponder com as situações do mundo real e atender às diversas restrições.

Burke et al. (2003 apud POLTOSI, 2007b) classificam o Problema de Escalonamento de Enfermeiros (PEE) como sendo um problema de otimização  $\mathcal{NP}$ -difícil, devido à complexidade fundamentar-se nas restrições fortes e fracas existentes nas escalas. Esse problema é definido na literatura como "*Nurse Rostering Problem*" ou "*Nurse Scheduling Problem*".

Tal problema expressa motivação econômica, uma vez que busca diminuir os custos com geração de horários de modo manual, como levantado por Poltosi (2007b), bem como o esforço em ajustar às necessidades da instituição as necessidades dos enfermeiros, para conter o desperdício ou excesso de recursos. Existe também a motivação científica, devido a inexistência de algoritmo capaz de obter em tempo computacional viável uma solução ótima, afirmado por Furtado e Varreira (2013).

O PEE consiste em gerar escalas de trabalho para enfermeiros atribuindo um conjunto  $N$  de enfermeiros a um período  $D$  de dias. Cada enfermeiro tem um turno  $T$  atribuído para cada dia  $D$  do período. Escalas são o modo como cada organização alinha a sua própria jornada de trabalho levando em consideração as restrições classificadas como fortes e fracas. Essas restrições são definições contidas nos contratos de trabalho, nas preferências dos funcionários, na legislação trabalhista, nas preferências e/ou necessidades levantadas pelo enfermeiro chefe, entre outras. As características das restrições são responsáveis por definirem o quão complexo é o problema.

Trabalho por turnos é definido como:

“Aquele em que a organização do trabalho é efetuada por equipes em que os trabalhadores ocupam sucessivamente os mesmos postos de trabalho a um determinado ritmo, rotativo, contínuo ou descontínuo.”(ECONOMIAS, 2016)

Os turnos variam de acordo com as organizações, estas são livres para determinar qual ou quais escalas de turnos pretendem adotar. Constantino et al. (2009) definem uma jornada como uma sequência de turnos e as tarefas como a necessidade de atribuir a um dia da escala a determinado turno. No Brasil, de acordo com o Conselho Regional de Enfermagem do Distrito Federal (COREN, 2011), a carga horária semanal de trabalho varia de 30 a 40

horas semanais e as jornadas diárias de trabalho variam de 6 horas, 8 horas, 12 horas de trabalho por 36 de descanso e ainda 4 dias de 6 horas e 1 dia de 12 horas.

Causmaecker e Berghe (2004) categorizam os problemas de escala de enfermeiros ou agendamento hospitalar em:

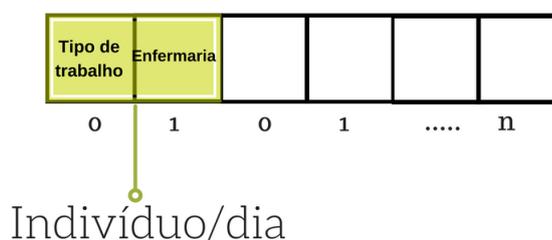
- **Pessoal do hospital:** a determinação do número de pessoas com as habilidades necessárias para cumprir com os requisitos existentes. A estrutura organizacional, aspecto de recrutamento de pessoal, classes de habilidades do pessoal, preferências dos trabalhadores, necessidades dos pacientes, circunstâncias particulares das unidades de saúde, são alguns dos fatores que tornam a tarefa complexa.
- **Agendamento centralizado:** duas vantagens são a imparcialidade para os funcionários por meio da aplicação consistente, objetiva e imparcial de políticas e oportunidades de contenção de custos por meio do melhor uso dos recursos. Os agendamentos são construídos pelos enfermeiros chefes ou gerentes de unidades. Por essa razão é considerado vantagem, visto que os enfermeiros têm uma atenção mais personalizada. Em contrapartida, a enfermeira chefe pode estar a dar tratamento preferencial para certas pessoas, causando desconforto nos demais enfermeiros.
- **Autoagendamento:** é mais demorado do que o agendamento automático, todavia tem a vantagem de os enfermeiros participarem na atividade de planejamento. São realizados geralmente pelos próprios enfermeiros com a coordenação do enfermeiro-chefe. Tal técnica é considerada tão comum, que a automação completa não é recomendada. Um dos métodos que podem ser adotadas inclui a habilitação dos funcionários para trocar de turnos.
- **Agendamento cíclico:** refere-se a organização em que cada pessoa trabalha um ciclo durante várias semanas. Os funcionários tem conhecimento de seu ciclo com bastante antecedência e os mesmos padrões de escala se repetem. Apesar de possuir benefícios, as desvantagens estão relacionadas à inflexibilidade, por não ser possível ajustar preferências pessoais sem realizar significativas mudanças na escala.

A existência de diversos trabalhos na literatura que abordam o problema de escalonamento de enfermeiros, confirmam o crescimento de interesse em tal assunto. Observa-se que o estudo deste engloba diferentes objetivos que estão ligados: a descoberta de uma nova estratégia para o campo de pesquisa, modelos para resolução de obstáculos encontrados no agendamento de escala em uma organização e a necessidade de aprimoramento de estratégias já implementadas.

## 2.3 Revisão bibliográfica

Em [Boaventura, Pinto e Yamanaka \(2013\)](#) aplicou-se a técnica de algoritmos genéticos na criação de uma grade horária otimizada para enfermeiros optando-se pela representação do cromossomo com valores decimais. No trabalho citado, o indivíduo possui um cromossomo de  $n$  genes, em que  $n$  é dado por  $2 \times \text{quantidade de enfermeiros} \times \text{quantidade de dias no mês}$ , como mostrado na [Figura 1](#). O dia do indivíduo no período de trabalho é representado por um par genes, no qual a posição par é representado o tipo de trabalho a ser realizado e na posição ímpar a enfermaria em que deverá ser realizado tal trabalho. No cromossomo, a representação do tipo de trabalho é definida utilizando valores entre 0 e 6 e a de enfermaria varia de 1 até quantidade de enfermarias cadastradas.

Figura 1 – Cromossomo



Fonte: figura elaborado pela autora com base no cromossomo adotado pelos autores daquele trabalho

A função objetivo leva em consideração 11 regras básicas obtidas no Hospital das Clínicas da Universidade de São Paulo (USP) de Ribeirão Preto, que podem ser ativadas ou desativadas pelo usuário. No trabalho em questão as técnicas utilizadas são as de mutação e cruzamento. Na mutação pode-se alterar até 10 genes, mas o padrão é a alteração de somente 1 gene. O cruzamento utilizou técnicas de torneio e roleta, empregados na seleção dos pais e na aplicação posterior de um ponto de corte e reinserção. Para isso, foram utilizadas soluções baseadas em elitismo total ou parcial. O projeto desenvolveu uma interface gráfica que permitiu a interação do usuário com o algoritmo, concedendo ao usuário a opção de manipular as restrições ativando ou desativando cada uma. Os experimentos sugerem que o algoritmo pode evoluir a solução de maneira apropriada, contudo em alguns casos necessita de várias gerações, conseguindo assim em sua maioria dar resultados com solução satisfatória.

[Valouxis et al. \(2012\)](#) usufruíram das especificações do problema de agendamento de enfermeiros definidos pela Primeira Competição Internacional do Problema de Escalonamento de Enfermeiros, que ocorreu em 2010. Os autores constituíram a equipe vencedora do evento. As instâncias dos problemas disponibilizadas pela competição, foram divididas pelos autores em subproblemas de tamanhos que possibilitassem o gerenciamento

computacional e posteriormente a resolução dos subproblemas utilizando Programação Matemática Inteira. No trabalho foi implementado uma estratégia composta por duas fases. A primeira fase realiza a definição da carga de trabalho individual dos enfermeiros para determinado dia da semana, atendendo assim a exigência que define que um funcionário deve ser atribuído a um único turno por dia, e que a demanda mínima de funcionários por dia deve ser atendida. Utilizou-se três processos de heurística de busca local com o intuito de melhorar a solução vigente, a solução heurística consistia na realização de movimentos complexos que consideravam vários movimentos simples de horários para os enfermeiros individualmente. A ideia principal é a recombinação de horários parciais para geração de novos horários. Na segunda fase, os turnos diários são atribuídos aos enfermeiros, e todas as combinações de definição do turno são gerados e analisados, considerando que o dia pode ser de trabalho ou de descanso. Também aplicaram técnicas de otimização local para a busca de combinação de modelos parciais para enfermeiros.

O algoritmo de [Valoux et al. \(2012\)](#) foi implementado em Java com a biblioteca *GNU Linear Programming Kit (GLPK)*, que foi aplicada na resolução de todas as instâncias apresentadas. Na competição é proibido o uso de produtos comerciais que requerem licenças de tempo de execução. Também utilizaram uma série de padrões de projetos com o objetivo de organizar melhor o código e melhorar a qualidade do mesmo. A competição e suas características são detalhadas na [Seção 2.4](#).

Os resultados foram dados levando em consideração os conjuntos de dados conhecidos e ocultos. A abordagem dos autores rendeu a equipe a colocação entre os melhores resultados em todas as faixas, estatisticamente falando, conseguiram atingir o melhor resultado conhecido em 70% das instâncias disponibilizadas. O pior resultado esteve a apenas 16 unidades do melhor valor. A abordagem daqueles autores concedeu-lhes os melhores resultados em 6 de 10 instâncias *sprint*, 3 de 5 instâncias *medium* e 4 de cada 5 instâncias *long*, definidas todas elas como ocultas. Aqueles autores atribuem a força da abordagem ao particionamento adequado do problema e utilização de formulações matemáticas para resolver otimamente partes dele e a programação eficiente do restante da aplicação.

O trabalho de [Bilgin et al. \(2010\)](#) descreve o algoritmo desenvolvido pela equipe para a Primeira Competição Internacional do Problema de Escalonamento de Enfermeiros. A equipe foi uma das finalistas da competição e obteve bons resultados com sua implementação baseada em uma hiper-heurística considerada por eles como de última geração, e que é seguida por uma heurística de embaralhamento guloso. Os componentes do algoritmo são utilizados em momentos diferentes, a hiper-heurística é utilizada nos primeiros 80% do tempo de computação. Esta consiste na seleção aleatória de duas enfermeiras pertencentes ao conjunto de enfermeiros e realizam movimentos de troca baseados em subconjuntos de dias, fins de semana ou dias de trabalho. Os 20% de tempo restantes são consumidos

pela heurística gulosa, que é uma versão estendida do embaralhamento guloso, em que intenciona melhorar as trocas parciais entre enfermeiras. As trocas são aceitas somente se esta é capaz de manter ou melhorar a solução. O espaço de solução é uma matriz e sua solução inicial é construída aleatoriamente de modo a garantir a viabilidade da solução. A viabilidade da solução acontece por meio da limitação dos movimentos que sempre ocorrem dentro da mesma coluna.

Aqueles autores procuram resolver o problema por meio de Programação Linear Inteira (PLI) com o uso do IBM CPLEX, como maneira de ajudar a estimar a qualidade das soluções obtidas pela abordagem híbrida implementada. A abordagem dos autores supera a dos resultados de PLI nas instâncias de faixa *medium*, e na faixa *sprint* os resultados obtidos são tão bons quanto os gerados com a heurística PLI, produzindo soluções próximas do ideal para esta faixa.

Em seu trabalho, Borba (2010) utiliza a meta-heurística *Iterated Local Search* (ILS) com busca local gulosa para a solução do problema de equipes de trabalho de saúde pública. Aquele autor observou a existência da diferença no volume de tarefas entre as equipes de trabalho e a divergência nos tipos de tarefas entre as equipes. O objetivo daquele trabalho dá-se na busca pelo equilíbrio do volume de tarefas entre as equipes e o máximo de igualdade nas tarefas distribuídas.

Aquele autor desenvolveu dois algoritmos. O algoritmo inicial buscou contabilizar a quantidade de pessoas existentes na área atendida, e a cada 4.000 pessoas uma equipe de trabalho era designada para essa população. Em um segundo momento, esse algoritmo era responsável por distribuir tarefas às equipes. Os resultados sugerem que essa solução inicial proporcionou melhoras superiores a 7% para Unidades de Pronto Atendimento (UPA), e de 18% para Programa de Saúde da Família (PSF). O segundo algoritmo aplica o movimento de busca local com o Método de Descida Local Gulosa, ocasionando a troca de microáreas assistidas. A procura por uma melhor distribuição de tarefas entre as equipes resulta na facilitação da assistência de microáreas. Como resultado alcançou-se melhorias expressivas e de importância relevante, visto que estes foram os primeiros resultados via meta-heurísticas para esse tipo de problema. Em relação às instituições envolvidas obteve-se a redução de custo operacional devido à equalização das tarefas, evitando assim a sobrecarga dos funcionários em ambas realidades, além da melhoria na satisfação dos funcionários por terem suas preferências atingidas e o aumento da satisfação por parte dos pacientes pela maior cobertura dos profissionais em horários de maior demanda no caso do UPA.

O trabalho de Jan, Yamamoto e Ohuchi (2000) busca investigar as dificuldades que ocorrem durante a solução do *Nurse Scheduling Problem* (NSP) utilizando Algoritmos Evolutivos, em particular Algoritmos Genéticos. O trabalho explanado leva em consideração os objetivos do hospital, que são os acordos de trabalho, e as preferências individuais dos

enfermeiros. Todos os enfermeiros trabalham nos três turnos vigentes e em alguns feriados. O problema é representado por uma matriz  $M \times N$ , em que  $M$  representa o número máximo de dias a serem agendados e  $N$  o número máximo de enfermeiros a serem alocados, tal representação é adotada de modo bem similar neste trabalho. São levadas em consideração restrições fortes e fracas, que são as que devem ser atendidas obrigatoriamente e as que serão atendidas caso seja possível, respectivamente.

O cálculo do *fitness* submete todos os enfermeiros individualmente à uma mesma função. Para o objetivo de maximização é realizado o cálculo da média do *fitness* de todos os enfermeiros, e a minimização consiste na variância entre a avaliação de todos os enfermeiros. A escala com o cálculo atingindo média = 0 e variância = 0, representa que o agendamento em questão é a solução desejada para o problema.

Em um trabalho anterior Yamamoto, Kawamura e Ohuchi (1998 apud JAN; YAMAMOTO; OHUCHI, 2000) propuseram um algoritmo para a solução do NSP usando o feromônio. O feromônio é utilizado para a comunicação entre as formigas, e no trabalho em questão eles também utilizaram de modo que cada enfermeira pode melhorar a sua escala com dois tipos de operadores, o *'swap'* e *'slide'*. A informação do feromônio é usado na resolução de conflitos entre enfermeiros, mas infelizmente a adoção dessa prática nem sempre garante a geração de escalas viáveis. Para a diversificação do espaço de solução foram utilizados *crossover* e mutação, contudo a mutação simples não resultou em melhora no desempenho de busca do *Cooperative Genetic Algorithms*(CGA), visto que a probabilidade de seleção dos turnos diurnos é alta. Devido a tal comportamento aqueles autores optaram pelo desenvolvimento do operador de fuga, que tem como estratégia a fuga dos mínimos locais, assim este operador seleciona dois enfermeiros aleatoriamente e realiza a troca de turnos em bloco entre elas. Com o objetivo de investigar os problemas que ocorrem durante a solução do NSP usando a abordagem de computação evolucionária, em particular os algoritmos genéticos, o desenvolvimento e adoção do operador de fuga é a melhor escolha para a melhora do CGA, devido a simplicidade e eficiência do mesmo.

A Seção 2.4 apresenta a justificativa da adoção de dados da competição e tem o propósito de expor as descrições e características do problema abordado. O problema a ser elucidado é o mesmo do tratado pelos trabalhos de Valouxis et al. (2012) e Bilgin et al. (2010).

## 2.4 Descrição do problema abordado

Com intenção inicial de utilização de instâncias de dados reais, foram procuradas algumas instituições em Minas Gerais, como o Hospital João XXIII, situado no bairro Santa Efigênia em Belo Horizonte, o Biocor Instituto, instalado no bairro Vila da Serra em Nova Lima e o Hospital Santa Rita, no bairro Jardim Industrial em Contagem. Contudo,

após o contato constatou-se que a realidade encontrada é divergente das encontradas em alguns trabalhos na literatura e do objetivo do trabalho. As instituições procuradas tem seu corpo de enfermagem com jornadas de trabalho consideradas fixas e pré-determinadas, em escala de 12 horas de trabalho por 36 de descanso ou escalas em que o dia é dividido em 3 turnos, e o noturno adota escala de 12 horas de trabalho por 36 de descanso e o matutino e vespertino empregam a escala de 6 horas diárias. As escalas citadas são em relação à setores específicos das instituições. Todas as instituições citadas como procuradas anteriormente têm seus respectivos funcionários em regime fixo de escala de horário.

Visto que as instituições procuradas adotam as escalas fixas de horário, optou-se pela utilização de instâncias da literatura. Os dados de entrada para esse trabalho são disponibilizadas pela *International Nurse Rostering Competition* (INRC).

### 2.4.1 *Internacional Nurse Rostering Competition*

A *International Nurse Rostering Competition* busca desenvolver o interesse na área de escala de horários e agendamento. A competição fornece aos pesquisadores modelos de problemas enfrentados que incorporam um aumento do número de restrições do mundo real. A competição tem três objetivos:

- gerar novas abordagens para os problemas associados atraindo usuários de todas as áreas de pesquisa;
- fechar o vão entre a pesquisa e a prática na área da pesquisa operacional;
- estimular o debate dentro da crescente comunidade de pesquisa de escalas de horários e agendamentos.

A competição é organizada e administrada pelo grupo de pesquisa *Combinatorial Optimisation and Decision Support* (CODES) na *Katholieke Universiteit Leuven* na Bélgica, *Stiftelsen for industriell og teknisk forskning* (SINTEF) Group na Noruega, e na *University of Udine*, na Itália. O documento de [Haspeslagh et al. \(2010\)](#) fornece informações necessárias para a facilitação da interpretação dos dados de entrada e das regras, apesar da explicação não ser clara o suficiente para o entendimento completo e correto em alguns pontos do documento.

O modelo deve ser capaz de formular soluções para o problema dentro das restrições definidas na competição. O principal objetivo é a geração de um cronograma que atribua tipos de turnos para os enfermeiros dentro de um período de planejamento e capaz de gerar uma solução viável com o menor custo possível. Os turnos de trabalho são um período predefinido com horário de início e fim que podem se diversificar dependendo da realidade encontrada. Os membros podem se encontrar de folga ou trabalhando nestes turnos. A

Figura 2 ilustra de maneira simplificada os possíveis horários encontrados nas instâncias disponibilizadas.

Figura 2 – Tipos de Turno

	TIPO	INICIO	FIM
L	Late	14:30	22:30
D	Day	08:30	16:30
E	Early	06:30	14:30
N	Night	22:30	06:30
HD	Head nurse	08:30	16:30

Fonte: elaborado pela autora e informações retiradas das instâncias

Os dados de entrada são arquivos de texto que especificam as informações de cada contrato, a quantidade de enfermeiros, tipos de turno entre outras informações. O período de planejamento é de 28 dias, podendo a data de início e fim se diferenciarem de arquivo para arquivo. A matriz, na qual as atribuições de turnos são armazenadas, é chamada de escala. Cada tipo de turno ou folga é atribuído a um enfermeiro em uma determinada data. Encontra-se ilustrada na Figura 3 o significado de atribuição de turnos a funcionários com um exemplo simples.

Figura 3 – Exemplo de Escala

	DIA 1	DIA 2	DIA 3	DIA 4	DIA 5	DIA 6	DIA 7
FUNCIONARIO1	E	E	N	-	L	E	E
FUNCIONARIO2	L	D	-	L	N	D	-
FUNCIONARIO3	N	-	D	E	D	-	N
FUNCIONARIO4	-	L	L	N	-	L	L

Fonte: elaborado pela autora

Observa-se que existem quatro funcionários para um período de planejamento de sete dias, no qual cada coluna representa um dia do período de planejamento e os turnos atribuídos são correspondentes aos tipos de alguns turnos disponibilizados na Figura 2. As

limitações presentes no cenário são chamadas de restrições, que não são nada mais que os contratos e regulamentos de trabalho junto a organização. Esses documentos especificam a condição para trabalho, bem como a existência de horários parciais, turnos noturnos e trabalho aos fins de semana. Este trabalho levou em respeito as restrições impostas pela competição.

### 2.4.2 Restrições

O problema de escala de horários para enfermeiros é um problema real e que possui restrições impostas que influenciam na construção de um modelo de otimização viável. Existem dois tipos de restrições: **restrições fortes**, que são as restrições que devem ser satisfeitas a todo custo; e as **restrições fracas ou suaves**, que são restrições que devem ser satisfeitas caso haja a possibilidade, ou seja, é possível violar alguma restrição suave para geração de uma solução satisfatória. As restrições existentes são as definidas pela competição e encontradas na documentação da mesma. O detalhamento do problema, bem como as informações referentes à competição são dados pelo artigo de [Haspeslagh et al. \(2010\)](#). Todas as restrições detalhadas pelo documento citado anteriormente foram consideradas pelas equipes participantes da competição. Apesar do documento buscar ser claro em suas informações, existiram explanações que não contribuíram para a interpretação completa dos dados, por conseguinte, as restrições serão detalhadas de acordo com a implementação adotada pela autora, para que se possa entender como as penalizações foram aplicadas. Para que uma solução seja considerada viável, ela não deve violar qualquer uma dessas restrições fortes:

$R_1 \leftarrow$  Todos os turnos exigidos devem ser atribuídos a um enfermeiro, ou seja, a demanda diária deve ser satisfeita obrigatoriamente;

$R_2 \leftarrow$  Um enfermeiro pode trabalhar um turno por dia somente, ou seja, não se pode atribuir a um enfermeiro mais de dois turnos em um único dia;

Como o problema espelha situações do mundo real, a documentação procura englobar uma grande quantidade de situações vistas no cenário real. As restrições fracas serão atendidas de modo a buscar atender todas, mas se tal cenário não for possível, a violação de algumas ocorrerá provavelmente. Não é desejável a violação destas, pois a quantidade de violações repercutirá no custo final da solução. A lista de restrições fracas são descritas como:

$Rf_1 \leftarrow$  Número máximo de atribuições para os enfermeiros: a definição da quantidade máxima de dias que devem ser trabalhados por determinado enfermeiro no período de planejamento;

$Rf_2 \leftarrow$  Número mínimo de atribuições para os enfermeiros: a definição da quantidade mínima de dias que devem ser trabalhados por determinado enfermeiro no período

de planejamento;

$Rf_3 \leftarrow$  Número máximo de dias trabalhados consecutivos: quantidade máxima de dias trabalhados consecutivos sem atribuição de folgas;

$Rf_4 \leftarrow$  Número mínimo de dias trabalhados consecutivos: quantidade mínima de dias trabalhados consecutivos sem atribuição de folgas;

$Rf_5 \leftarrow$  Número máximo de dias de folga consecutivos;

$Rf_6 \leftarrow$  Número mínimo de dias de folga consecutivos;

$Rf_7 \leftarrow$  Número máximo de fins de semana trabalhados consecutivamente: o fim de semana é considerado completo se em nenhum dia, dentro do período definido como fim de semana, foi atribuído folga ao enfermeiro;

$Rf_8 \leftarrow$  Número máximo de fins de semana trabalhados em 4 semanas: quantidade máxima de fins de semana sem folga em 4 semanas, se no período definido como fim de semana tem ao menos uma folga, o mesmo não é considerado na conta;

$Rf_9 \leftarrow$  Fins de semana completos: a enfermeira tem que trabalhar todos os dias em um final de semana, se existir uma ou mais folgas atribuídas à ela, ocorrerá penalização pela violação da restrição;

$Rf_{10} \leftarrow$  Fins de semana completamente idênticos: o enfermeiro precisa necessariamente trabalhar em turnos idênticos no fim de semana, por exemplo, se ele trabalhar no turno D no sábado, necessariamente necessita trabalhar no domingo no turno D. Se em todos os dias do período informado como fim de semana estiver como folga, também é considerado um final de semana completamente idêntico;

$Rf_{11} \leftarrow$  Não trabalhar no turno noturno antes de um fim de semana livre: é considerado violação se o primeiro dia do fim de semana é uma folga e o dia anterior é um turno noturno;

$Rf_{12} \leftarrow$  Dois dias de folga depois de um turno noturno: o enfermeiro que trabalhou em um turno noturno em um determinado dia, não poderá ter atribuído à ele o turno noturno novamente nos próximos dois dias;

$Rf_{13} \leftarrow$  Solicitação do enfermeiro para folga em um certo dia: o enfermeiro tem a oportunidade de expressar a sua vontade de folga em uma determinada data;

$Rf_{14} \leftarrow$  Solicitação do enfermeiro para trabalho em um certo dia: o enfermeiro tem a oportunidade de expressar a sua vontade de trabalhar em uma determinada data;

$Rf_{15} \leftarrow$  Solicitação do enfermeiro para folga em um certo turno em um determinado dia: o enfermeiro tem a oportunidade de expressar a sua vontade de folga em um certo turno em uma determinada data;

$Rf_{16} \leftarrow$  Solicitação do enfermeiro para trabalho em um certo turno em um deter-

minado dia: o enfermeiro tem a oportunidade de expressar a sua vontade de trabalhar em um certo turno em uma determinada data;

$Rf_{17} \leftarrow$  Alternativa de habilidade: Um enfermeiro não pode trabalhar em um turno que ele não tem a habilidade necessária, ou seja, não se pode atribuir ao funcionário um turno noturno se este não tem habilidade para realizar tal tarefa;

$Rf_{18} \leftarrow$  Padrões indesejados: é uma sequência de atribuições ou não, de tipos de turno para uma enfermeira. Os padrões indesejados são os que estão definidos na instância. Os padrões indesejados podem ser de dois tipos:

- Padrões indesejados que não envolvam tipos de turno específicos.
- Padrões indesejados que envolvam tipos específicos de turno.

As escalas dos funcionários são submetidas a avaliação perante as restrições apresentadas. As restrições tem um peso individual associado, a violação das restrições influencia no custo final da solução. O cálculo da função objetivo é baseado nas penalizações registradas (Seção 2.4.3) caso esta seja violada.

### 2.4.3 Função objetivo

O objetivo do problema proposto é encontrar soluções viáveis e/ou factíveis que minimizem o Problema de Agendamento de Escala de Enfermeiros (PAEE). A heurística é conduzida por uma função de avaliação, chamada de função objetivo, que busca estimar a qualidade dos planejamentos. Uma vez que para que uma solução seja considerada factível, ela precise respeitar as restrições fortes, e as restrições fracas são as que irão determinar o custo da escala gerada. Nesta seção é apresentado de modo sucinto e preciso o método desenvolvido para modelar e avaliar as restrições envolvidas no problema. As instâncias do problema são as envolvidas no contrato, bem como o peso da penalização para cada restrição violada.

O método com que a população foi gerada e é representada, assim como operador de mutação desenvolvido, garantem que as restrições fortes ( $R_1$  e  $R_2$ ) não são violadas, evitando que a solução se torne infactível e/ou inviável. O cálculo da função objetivo leva em consideração todo o horizonte de planejamento, ou seja, todas as restrições fracas ( $Rf_{1...18}$ ) são verificadas nos funcionários individualmente para todo o horizonte de agendamento definido. Ao identificar o número de violações  $V$  dentro da solução, é aplicado o peso  $W$  correspondente, o produto entre esses fatores é o valor da penalização a ser aplicada (Equação 2.1).

$$Rf_i = V_i * W_i \quad (2.1)$$

O cálculo do custo (Equação 2.2) é dado pelo somatório de todas as penalizações calculadas para cada restrição violada. De modo a verificar se a implementação das restrições e o cálculo da função objetivo estavam corretos, utilizou-se o Avaliador disponibilizado pela competição. O Avaliador é um *.jar*<sup>1</sup> que ao submeter as informações da escala de acordo com o modelo de arquivo solicitado, retorna o valor do custo da solução, tal como o local que se encontram as violações. O resultado gerado pelo Avaliador da competição foi comparado com o resultado obtido no cálculo da função objetivo do trabalho. Como resultado, o custo da avaliação empregada neste trabalho estava correto.

$$FO = \sum_{i=1}^{18} Rf_i \quad (2.2)$$

## 2.5 Considerações gerais

O problema de agendamento é a base para o entendimento do contexto a ser estudado no trabalho e ajuda a compreender o interesse ligado ao contexto de alocação de horário para recursos por parte dos pesquisadores. Como explanado, o problema possui diversas áreas que podem e são exploradas por diferentes motivos, como de pesquisa por parte dos estudiosos, aplicação da teoria na prática ou mesmo o encontro de soluções para facilitar a execução da tarefa.

O contexto do problema de agendamento de enfermeiros é de fácil entendimento, visto que é uma situação costumeira para a população que faz uso de tais recursos. É visto que as restrições são numerosas e variadas, podendo resultar, em condições manuais, a impossibilidade de atingir uma solução viável, afinal um outro fator é levado em consideração, o tempo. A revisão bibliográfica descreveu sobre diversas possibilidades de contextos a serem abordados e as infinitas oportunidades de aplicação de estratégias para atingir algum resultado. Foram citados trabalhos que aplicaram Busca Tabu, algoritmos genéticos, matemática inteira, heurísticas de busca local, e observa-se a predominância pela utilização de estratégias híbridas, que contribuiu para que atingissem resultados satisfatórios.

A competição teve grandes pesquisadores já envolvidos com problemas similares. As especificações do problema contribuíram para que se tornasse viável a utilização das instâncias disponibilizadas e das restrições definidas. Outro fator importante para a escolha dos dados foi a disponibilização dos menores custos encontrados para cada instância fornecida, podendo assim permitir uma possível comparação com os custos atingidos por este trabalho.

---

<sup>1</sup> O *Java Archive (.jar)* é um formato de arquivo usado para empacotar vários arquivos da classe e recursos auxiliares em um único arquivo.

## 3 Implementação

A Computação Evolutiva, como afirmado por Zuben (2000), representa uma iniciativa de implementação computacional de regras de evolução simplificadas, no qual os indivíduos mais adaptados sobrevivem e propagam seu material genético para as próximas gerações. A população inicial tende a evoluir para regiões melhores dentro do espaço de busca, uma vez que a população sofre transformações e durante a evolução os indivíduos competem pela permanência como sobrevivente.

Zuben (2000) apresenta as três principais abordagens propostas da bibliografia para algoritmos evolutivos: algoritmos genéticos, estratégias evolutivas e programação evolutiva, em que suas principais diferenças estão nos operadores genéticos empregados. O trabalho implementou estratégias evolutivas, pois buscam variação a fim de criar diversidade na população para que essa seja transmitida por herança, conduzindo o refinamento da população inicial para um ambiente com indivíduos candidatos mais próximos à solução problema. O capítulo intenciona explicar sobre a estratégia evolutiva e detalhar como foi implementado o algoritmo, para que assim facilite a compreensão da lógica implementada e continuação do trabalho posteriormente, uma vez que a estrutura foi esclarecida.

A Seção 3.1 apresenta a estratégia evolucionária, que é a abordagem definida para implementação, na qual são apresentados os seus conceitos e características. De maneira detalhada também encontra-se a implementação do algoritmo e de métodos essenciais para a aplicação da estratégia, como a inicialização da população (Seção 3.1.1), o operador de mutação adotado (Seção 3.1.2) e a heurística de busca local (Seção 3.1.3)

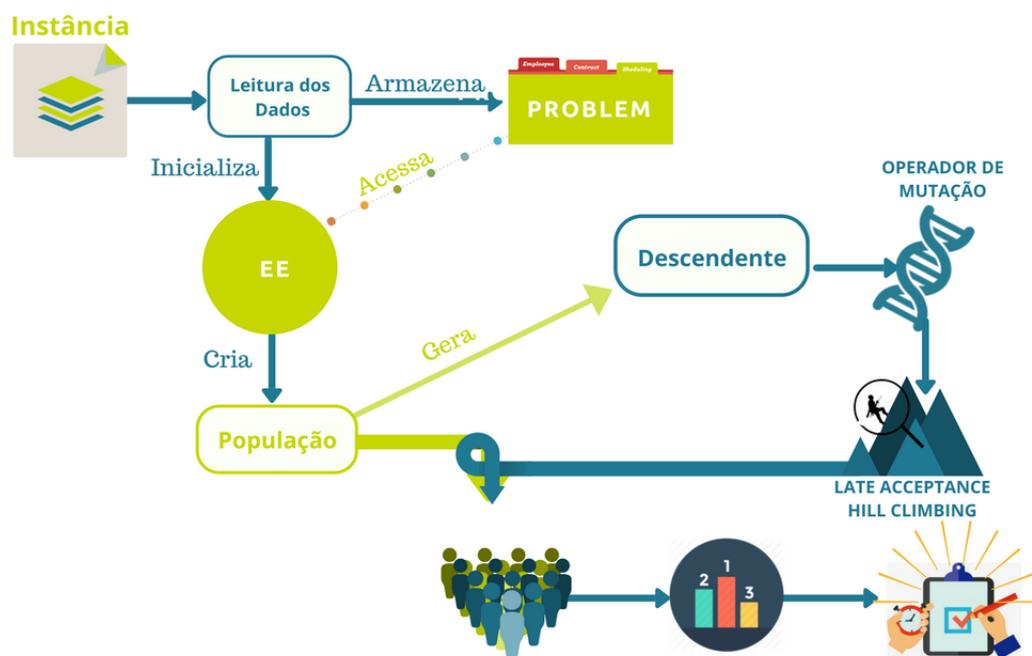
### 3.1 Estratégia Evolutiva

Estratégias Evolutivas (EE) (ZUBEN, 2000) foram propostas inicialmente com o objetivo de solucionar problemas de otimização de parâmetro, e justamente por empregarem operadores de mutação obtiveram grandes contribuições em relação a síntese e análise destes operadores. A EE dá-se a partir de uma população com  $\mu$  indivíduos que gerará  $\lambda$  descendentes, ocorrendo uma reprodução com herança genética. Essa estratégia utiliza como operador principal a mutação que tem a capacidade de inserir variações aleatórias em uma população de indivíduos. As EE's multi-membros possuem dois tipos principais:  $(\mu + \lambda)$  e  $(\mu, \lambda)$ . Os descendentes são indivíduos pais que sofreram mutação, contudo a união de  $\mu + \lambda$  levará a seleção dos melhores  $\mu$  indivíduos. No processo de seleção, o filho será aceito na nova geração somente se ele possuir um *fitness* melhor que o dos pais e for considerado factível. Isso é chamado na literatura de "seleção natural". O outro modelo mencionado tem  $\lambda$  descendentes gerados por  $\mu$  indivíduos que resultam em  $\mu < \lambda$ . No

processo de seleção a nova geração terá  $\mu$  indivíduos constituídos somente por indivíduos selecionados do conjunto  $\lambda$  descendentes, configurando o limite máximo de sobrevivência de um indivíduo à uma geração. Esse tipo de EE tem ótimo desempenho em problemas em que o ponto ótimo é em função do tempo ou afetado por ruído.

Os passos para a construção de uma EE genérica dão início com a geração de uma população inicial e uma posterior avaliação de custo para todos os seus indivíduos. Enquanto a condição de parada determinada não é atingida, a geração de descendentes é efetuada com uma estrutura de repetição com limite de  $\lambda$  descendentes. Na estrutura de repetição são executados respectivamente, a seleção do pai, aplicação do operador de mutação e avaliação dos filhos gerados. Com o término de execução da estrutura são selecionados os melhores  $\mu$  indivíduos. Ao atingir o critério de parada o procedimento EE é finalizado.

Figura 4 – Algoritmo



Fonte: elaborado pela autor

A implementação da heurística do trabalho consiste basicamente na estrutura apresentada da EE. A Figura 4 ilustra de modo simplificado os passos da implementação desenvolvida, em que se inicia no processo de leitura de dados a obtenção das informações contidas na instância e assim dá prosseguimento com a inicialização da Estratégia Evolucionária. O método desenvolvido é referido ao longo da monografia como EE\_LAHC. A EE\_LAHC tem seu fluxo superficialmente ilustrado pela figura, mas é clarificado com a explanação do Algoritmo 1. A geração da população inicial (linha 2) é a primeira etapa e

é explicada de maneira mais minuciosa na [Seção 3.1.1](#). Com a finalização da geração da população é realizado o cálculo da função objetivo dos indivíduos (linha 3) e desse modo possibilita a obtenção do melhor indivíduo (linha 4), isto é, aquele com menor *fitness*, visto que o objetivo é minimizar o custo. O critério de parada é a quantidade de gerações. Cada indivíduo da população gera  $\lambda$  descendentes, que são gerados a partir do operador de mutação (linha 12) e tem sua estrutura explanada [Seção 3.1.2](#). Em busca de maior exploração do espaço de solução, é usado a busca local *Late Acceptance Hill-Climbing* (linha 13) detalhado na [Seção 3.1.3](#), que após a conclusão tem seus descendentes avaliados (linha 14). Com o fim do processo de geração de descendentes é realizada a ordenação da união do  $\mu + \lambda$  (linha 19) e selecionados os  $\mu$  indivíduos com menor custo (linha 20). A melhor solução é atualizada (linha 21), e caso o critério de parada (linha 6) não tenha sido atingido, o algoritmo dá continuidade a estratégia, até que a condição de parada seja

satisfeita.

<b>Algoritmo 1: ESTRATÉGIA EVOLUTIVA</b>	
<b>Entrada</b>	$: totalGeracoes, \mu \leftarrow$ quantidade de indivíduos da população, $\lambda \leftarrow$ quantidade de descendentes a serem gerados por cada indivíduo, $problema \leftarrow$ objeto que possui todos os dados da instância
1	<i>individuo</i>
2	<b>Início</b>
3	gere a população inicial com $\mu$ indivíduos
4	avalie todos os indivíduos
5	obtenha o melhor indivíduo
6	<b>para</b> $contGeracao < totalGeracoes$ <b>faça</b>
7	$pai \leftarrow 1$
8	<b>para</b> $pai < \mu$ <b>faça</b>
9	$descendente \leftarrow 1$
10	<b>para</b> $descendente < \lambda$ <b>faça</b>
11	clone o pai
12	mute o descendente
13	submete o descendente gerado à busca local
14	avalie o descendente gerado
15	$descendente \leftarrow descendente + 1$
16	<b>fim</b>
17	$pai \leftarrow pai + 1$
18	<b>fim</b>
19	$ordene (\mu + \lambda)$ <span style="float: right;"><math>\triangleright (\mu + \lambda) \leftarrow</math> união de <math>\mu</math> e <math>\lambda</math></span>
20	selecione os $\mu$ melhores indivíduos de $(\mu + \lambda)$
21	obtenha o melhor indivíduo
22	$contGeracao \leftarrow contGeracao + 1$
23	<b>fim</b>
	<b>retorna</b> : <i>melhorindivíduo</i>
24	<b>fim</b>

Fonte: pseudocódigo desenvolvido pela autora

### 3.1.1 Geração de solução inicial

A geração de solução inicial ocorre de modo aleatório, no qual a representação elaborada assegura uma solução viável, pois ao ser construída garante o atendimento das restrições fortes. A representação do agendamento é constituída por uma matriz  $M_{P \times F}$ , em que  $F$  corresponde ao número de funcionários informados pela instância e  $P$  o horizonte de planejamento, ou seja, a quantidade de dias que compõem o período de agendamento

imposto.

Todas as informações da instância são armazenadas na variável *problema*. *S* representa os sete dias da semana, por conseguinte para construção da solução inicial a demanda para  $s \in S$  é verificada (linha 4). A necessidade de funcionários para cada turno em determinado dia da semana é atribuído à um vetor *demanda*[ ] de tamanho com limite de  $F$  (linha 5), no qual  $F$  representa a quantidade de funcionários a serem contemplados pela instância. Após a inserção de turnos no vetor, as posições sem atribuição de turno são definidas com folgas (linha 6) e o vetor *demanda*[ ] tem o valor de suas posições embaralhados (linha 7) a fim aleatorizá-los para inserção na matriz.  $P$  é o período de dias de planejamento a serem atendidos, logo, para cada  $p \in P$ , que possui o dia da semana correspondente a  $s$  (linha 9), o  $f \in F$  têm um turno atribuído que corresponde a uma posição no vetor *demanda*[ ] (linha 11), observe o Algoritmo 2. A representação é ilustrada na Figura 5.

#### Algoritmo 2: SOLUÇÃO INICIAL

```

Entrada : problema  $\leftarrow$  objeto que possui todos os dados da instância
1 solucaoInicial[ $P$ ][ $F$ ]
2 Início
3   para  $s \in S$  faça
4     inicialize o vetor demanda[ ] com tamanho de  $F$ 
5     verifique a demanda de turnos de  $s$ 
6     atribui as posições demanda[ ] com os turnos
7     preenche as posições demanda[ ] sem atribuição com folga
8     embaralhe o vetor demanda[ ]
9     para  $p \in P$  faça
10      se dia da semana de p é igual a s então
11        para  $f \in F$  faça
12          preenche soluçãoInicial[ $p$ ][ $f$ ] com demanda[ $f$ ]
13        fim
14      fim
15    fim
16  fim
17 retorna : soluçãoInicial[ ][ ]
fim

```

Fonte: Algoritmo desenvolvido pela autora

Figura 5 – Representação da Solução

	DIA 1	DIA 2	...	DIA N
FUNCIONARIO1	E	-	...	D
FUNCIONÁRIO2	L	D	...	L
...	...	...	...	...
FUNCIONÁRIO N	-	N	...	N

Fonte: elaborado pela autora

### 3.1.2 Operador de mutação

Com o objetivo de gerar diversidade e melhorar a população, o trabalho empregou o operador de mutação. O operador de mutação (ZUBEN, 2000) altera um ou mais genes de um cromossomo. O indivíduo é submetido a uma probabilidade de ocorrência chamada de *taxa de mutação*, isto é, ele terá seu gene modificado somente se ele estiver dentro da *taxa de mutação*. Contudo, neste contexto foi definido que todos os indivíduos serão submetidos a esse operador.

No caso do problema e representação adotada, a mutação é aplicada sobre os funcionários para aumentar a variabilidade da população. Ao observar a Algoritmo 3, é possível notar que um dia aleatório dentro do horizonte de planejamento é sorteado (linha 2). A aleatorização ocorre para se possa garantir uma das restrições fortes, que é assegurar a demanda mínima exigida de enfermeiros para determinado dia. Exemplificando: ao garantir que alterações ocorram em um determinado dia e que essas alterações se darão com um *swap* de turnos entre funcionários, a demanda mínima necessária definida para o dia não será comprometida, visto que a quantidade de pessoas por turno não é violada. Em seguida são selecionados dois funcionários aleatoriamente (linha 4). Como o dia e funcionários foram determinados, a mutação ocorre por meio da troca desses genes (linha 5), o gene é uma posição na matriz de representação da solução. O fluxo acontecerá até

que o critério de parada seja atingido.

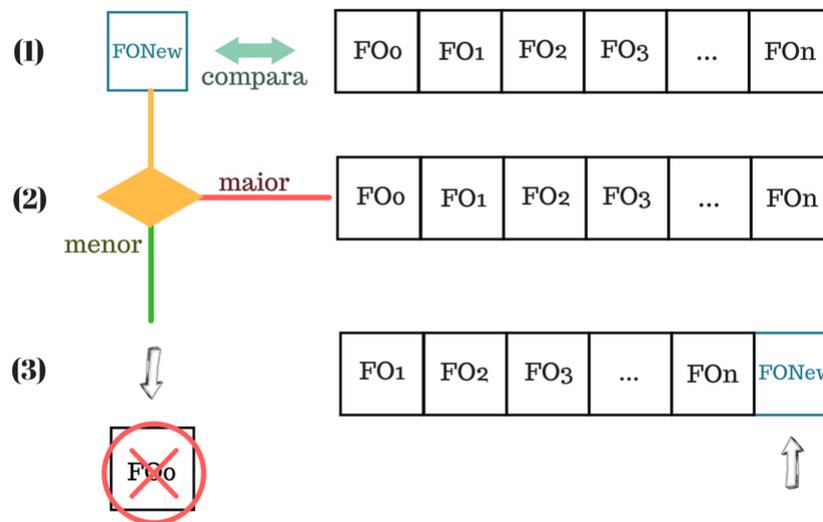
<b>Algoritmo 3: MUTAÇÃO</b>	
<b>Entrada</b>	: <i>individuo, problema</i> $\leftarrow$ objeto que possui todos os dados da instância
1	<i>individuo</i>
2	<b>Início</b>
3	<i>aleatorize</i> o dia
4	<b>para</b> $f \in F/2$ <b>faça</b>
5	
	$\triangleright F$ é a quantidade de funcionários da instância
6	<i>aleatorize</i> os funcionários
7	<i>realize</i> o <i>swap</i>
8	<b>fim</b>
	<b>retorna</b> : <i>individuo</i>
9	<b>fim</b>

Fonte: Algoritmo desenvolvido pela autora

### 3.1.3 *Late Acceptance Hill Climbing*

A estratégia de *Late Acceptance* (LA) (BURKE; BYKOV, 2017) tem uma ideia bastante simples, o parâmetro de controle na condição é retirado do histórico de soluções. A LA pode ser vista como uma extensão do *Hill Climbing* (HC), com a diferença que esse último a solução candidata é comparada com a solução atual. O *Late Acceptance Hill Climbing* (LAHC) é a combinação dessas duas heurísticas, em que o candidato é comparado com uma solução que foi gerada a várias iterações anteriores. O algoritmo é estabelecido com uma solução inicial, ou seja, todas as posições do vetor são inicializadas com o menor custo do indivíduo submetido a mutação. Sucessivamente ele aceita ou rejeita a nova solução de maneira iterativa até atingir a condição de parada, bem como no método HC.

Figura 6 – Late Acceptance Hill Climbing



Fonte: elaborado pela autora

O algoritmo verifica se o indivíduo será submetido ao LAHC (linha 4), conforme o apresentado no Algoritmo 4. Em caso afirmativo, ele inicia o histórico de soluções (linha 5) e preenche todas as posições com o valor da função objetivo do indivíduo recebido como parâmetro (linha 6). O critério de parada é o tempo (linha 8), e por consequente, até que tal critério seja atingido, o indivíduo recebido por parâmetro é clonado (linha 9) e submetido ao operador de mutação (linha 10) que logo após, tem seu custo calculado (linha 11). A regra de aceitação é mantida em um histórico de soluções de tamanho fixo que mantém os valores anteriores da função objetiva. Se a função objetivo do indivíduo resultante for melhor do que o custo armazenado na primeira posição do histórico (linha 12), o candidato é aceito e o histórico é atualizado adicionando o novo resultado no seu final (linha 14) e removendo o elemento que se encontra na primeira posição (linha 13). Caso o valor da função objetivo calculada seja rejeitado, o histórico de soluções permanece intacto, pois não ocorre atualização de valores, a [Figura 6](#) ilustra o conceito. A melhor

solução tem seus valores atualizados (linha 17).

<b>Algoritmo 4: LATE ACCEPTANCE HILL CLIMBING</b>	
	<b>Entrada</b> : <i>indivíduo</i> , <i>taxaBuscaLocal</i> , <i>tempoLimite</i> , <i>problema</i> ← objeto que possui todos os dados da instância
1	<i>indivíduo</i>
2	<b>Início</b>
3	<i>define</i> o indivíduo como o melhor custo
4	<i>aleatorize</i> a <i>probabilidade</i>
5	<b>se</b> <i>probabilidade</i> ≤ <i>taxaBuscaLocal</i> <b>então</b>
6	<i>inicialize</i> o histórico de soluções
7	<i>preenche</i> as posições do histórico com o melhor custo
8	$t \leftarrow 1$
9	<b>para</b> $t \leq \textit{tempoLimite}$ <b>faça</b>
10	<i>clone</i> o pai
11	<i>mute</i> o descendente
12	<i>avali</i> e o descendente gerado
13	<b>se</b> <i>custoHistoricoPrimeiraPosição</i> > <i>custoDescendenteGerado</i> <b>então</b>
14	<i>remove</i> primeira posição do histórico
15	<i>adicione</i> o custo do indivíduo no final do histórico
16	<b>fim</b>
17	<b>se</b> <i>custoIndivíduo</i> < <i>melhorCustoEncontrado</i> <b>então</b>
18	<i>atualize</i> o indivíduo com melhor custo
19	<b>fim</b>
20	<b>fim</b>
21	<b>fim</b>
	<b>retorna</b> : <i>indivíduo</i>
22	<b>fim</b>

Fonte: Algoritmo modificado pela autor

## 3.2 Considerações gerais

O Problema de Escalonamento de Enfermeiros foi solucionado com diversas estratégias, meta-heurísticas e técnicas diferentes ao longo do tempo. Pesquisadores sempre estão a procura de alguma solução inovadora que possa trazer resultados capazes de quebrar barreiras chamadas custo mínimo. Um problema corriqueiro mundialmente e de fácil compreensão, mas com soluções que demandam tempo. O trabalho adota mais de uma técnica na busca por soluções e estruturou-se de meio a aplicar a Computação Evolucionária atrelada a uma heurística de refinamento, afim de desenvolver uma solução

para o problema. A descrição da implementação busca auxiliar a compreensão da estratégia e a identificação de melhoras em posteriores trabalhos.

Após a conclusão da implementação o processo de teste para validação do mesmo tem a necessidade de ser efetuado. Os testes propriamente ditos vem para avaliar os resultados com base em parâmetros que definem a execução. Os parâmetros para serem definidas precisam passar por um processo de parametrização, na qual identifica-se os características capazes de revelar o melhor cenário para realização dos testes com base na heurística desenvolvida. Com a finalização do processo de implementação os testes podem ser iniciados e os resultados gerados avaliados.

## 4 Resultados

Esta fase de prosseguimento do trabalho trata da validação da implementação do algoritmo. Sendo a proposta do trabalho a implementação de um algoritmo que emprega Computação Evolucionária aplicada ao Problema de Geração de Escala de Enfermeiros, é necessário verificar os resultados obtidos com o método desenvolvida. Com esses experimentos pretende-se verificar se o algoritmo é capaz de cumprir com o objetivo de gerar soluções viáveis e examinar se ele é competitivo nas instâncias observadas.

O algoritmo proposto foi implementado utilizando a linguagem Java. Os experimentos foram realizados em um computador com 4 núcleos Intel(R) Core(TM) i5-2400 cpu@3.10GHz com *cache size* 6144kb, memória 8GB(Total) e sistema operacional *Ubuntu Server*. As instâncias utilizadas foram obtidas no site da *Nurse Rostering Problem Competition* (KULEUVEN, 2010). O site disponibiliza várias instâncias que possuem características particulares, pois cada faixa tem dados e tamanhos diferentes. A faixa *toy* é disponibilizada para iniciantes na compreensão e implementação da estrutura das instâncias e trabalha com o horizonte de planejamento de sete dias. A faixa *sprint* possui o tempo de execução limitado a dez segundos. A faixa *medium* tem o limite de execução fixado em dez minutos e a faixa *long*, incorpora o limite de tempo de execução de 10 horas. As últimas três faixas incorporam um horizonte mensal de agendamento.

Para explorar a capacidade do algoritmo, vários testes com diferentes parâmetros são realizados. As instâncias utilizadas foram as dos conjuntos *sprint*, *medium* e *long*. O processo de parametrização assim como a estrutura de teste adotada no trabalho é detalhado na [Seção 4.1](#). Após a definição de parâmetros os testes são executados e avaliados na [Seção 4.2](#).

### 4.1 Parâmetros e estrutura de testes

Este experimento tem por objetivo testar diferentes configurações no intuito de descobrir qual é o ambiente de configuração ideal para os testes. Logo, adotou-se os seguintes princípios: a aplicação da definição de valores dos parâmetros no método desenvolvido; a aleatorização dos valores definidos, com o propósito de gerar estimativas de execução válidas; e a replicação das configurações definidas.

Os valores dos parâmetros foram definidos de modo arbitrário e são exibidos na [Figura 7](#). A aleatorização das observações busca eliminar eventuais problemas de seleção e regressão estatística. Neste trabalho foram aleatorizados a execução das instâncias juntamente com a configuração dos parâmetros.

Figura 7 – Parâmetros Definidos

PARÂMETROS		
NÚMERO DE GERAÇÕES	100	1000
$\mu$	20	50
$\lambda$	5	10
TAMANHO DO VETOR LAHC	15	25
TAXA DE BUSCA LOCAL	0.3	0.7
TIMEOUT LAHC	100	1000

Fonte: elaborado pela autora

As instâncias submetidas ao processo de parametrização foram quatro, na qual buscou-se representar as três faixas adotadas, que são: *sprint*, *medium* e *long*. A faixa *sprint* teve duas modalidades exploradas no processo de parametrização. Tais modalidades são definidas pela competição como *early* e *hidden*. Com a aleatorização foi possível obter a minimização dos ruídos da tendência dos resultados. A replicação deu-se necessária, afinal é preciso verificar se o desempenho é similar em várias replicações, podendo avaliar a variabilidade do processo e a configuração que resultou no melhor custo.

A quantidade de observações de parametrização realizados é representada pela expressão  $\kappa * (\sum_i^4 2^6)$ . Na expressão,  $\kappa$  representa a quantidade de replicações a serem aplicadas sobre as possibilidades de configuração e tem seu valor definido como  $\kappa = 10$ . As possibilidades levam em consideração as quatro instâncias da parametrização, no qual cada instância  $i$  é submetida as duas possibilidades de valores definidos para os seis parâmetros  $2^6$ . Logo, o produto do somatório da quantidade de combinações de parametrização pela quantidade de replicações, resulta em 2.560 observações totais realizados para este trabalho. Durante o processo de parametrização, a cada nova replicação a ordem de execução dos observações sofre alteração. A prática da aleatorização foi adotada buscando a utilização de recursos computacionais diversificados, levando em consideração que o computador pode estar usando uma quantidade maior ou menor de recursos em determinados momentos.

Na finalização do processo obteve-se o valor dos parâmetros que constituíam uma configuração com os melhores resultados para as diversas instâncias. A [Tabela 1](#) apresentam a porcentagem de ocorrência das configurações dos parâmetros para os dez melhores custos de cada instância. Os melhores resultados são evidenciados com sua porcentagem na cor verde. Os números na coluna faixa representam: 0 - *Sprint\_early*; 1 - *Sprint\_hidden*; 2

Tabela 1 – Resultados Parametrização

Faixa	Gerações		$\mu$		$\lambda$		Tam. Vetor LAHC		Tx. Busca Local		Timeout LAHC	
	<b>100</b>	<b>1000</b>	<b>20</b>	<b>50</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>15</b>	<b>25</b>	<b>0,3</b>	<b>0,7</b>	<b>100</b>	<b>1000</b>
0	20%	80%	100%	0%	70%	30%	20%	80%	100%	0%	100%	0%
1	20%	80%	100%	0%	70%	30%	20%	80%	100%	0%	100%	0%
2	30%	70%	80%	20%	40%	60%	30%	70%	10%	70%	100%	0%
3	20%	80%	100%	0%	80%	20%	20%	80%	100%	0%	100%	0%

Fonte: elaborado pela autora

- *Medium\_early*; 3 - *Long\_early*. Com base nos dados da Tabela 1 foi possível obter os parâmetros de maior incidência capazes de trazer os melhores resultados.

Ao observar os testes para verificar o comportamento da implementação foi possível notar que após 550 gerações, do total de 1000 definidas no processo de parametrização, os resultados não evoluíam para custos menores. Após essa constatação optou-se em limitar a quantidade máxima de gerações à 550. A Figura 8 descreve os valores adotados para aplicação do experimento final do método. O critério de parada adotado para o método é a quantidade de gerações.

Figura 8 – Parâmetros Finais

PARÂMETROS	
NÚMERO DE GERAÇÕES	550
$\mu$	20
$\lambda$	5
TAMANHO DO VETOR LAHC	25
TAXA DE BUSCA LOCAL	0,3
TIMEOUT LAHC	100

Fonte: elaborado pela autora

Em sua totalidade foram selecionadas nove instâncias que fazem parte das faixas de *early*, *medium* e *long*. As instâncias são apresentadas na Tabela 2 e os resultados são dados na próxima seção.

Tabela 2 – Instâncias Seleccionadas

Instância	Horizonte de Planejamento (dias)	Número de Funcionários	Número de Turnos
sprint_early_01	28	10	4
sprint_early_02	28	10	4
sprint_hidden_01	28	10	3
sprint_hidden_02	28	10	3
sprint_hidden_03	28	10	4
medium_early_01	28	31	4
medium_early_02	28	31	4
medium_early_03	28	31	4
long_early_01	28	49	5

Fonte: [Kuleuven \(2010\)](#)

## 4.2 Análise dos resultados computacionais

Os experimentos finais levam aspectos iguais aos dos empregados no experimento de parametrização. A quantidade de execuções realizadas é representada pela expressão  $\kappa * (\sum_i^9 1^6)$ . Sendo  $\kappa = 10$ , a quantidade de replicações a serem aplicadas sobre a configuração determinada para cada uma das 9 instâncias seleccionadas. O  $1^6$  representa a existência de 6 parâmetros com uma configuração apenas. Logo, tem-se o total de 90 observações totais para este experimento. A cada nova replicação a ordem de execução das observações sofre alteração, bem como ocorreu na etapa de parametrização. O valor de  $\kappa$  foi definido com base no trabalho de [Bilgin et al. \(2010\)](#). Aqueles autores constituíram uma das equipes finalistas e adotaram replicar em dez vezes a implementação para cada instância de dados definida.

Os resultados de [Bilgin et al. \(2010\)](#) são usados como comparação neste trabalho devido a algumas semelhanças como estratégias de estruturação e implementação. As semelhanças que influenciaram na escolha do trabalho para comparação são: representação da solução por meio de matriz; solução inicial gerada de modo aleatório garantindo a viabilidade; movimentos que garantem a viabilidade durante toda a estratégia; escolhas aleatorizadas de enfermeiros e dias; e trocas de turnos que ocorrem dentro de uma mesma coluna.

As observações finais para o problema de agendamento de escala de enfermeiros tem seus resultados apresentados nas tabelas e gráficos a seguir. As [Tabela 3](#) e [4](#) apresentam o melhor custo encontrado para cada instância. Os resultados são divididos em duas tabelas em virtude de algumas instâncias não terem sido abordadas no trabalho de [Bilgin et al. \(2010\)](#) (TL), com isso essas instâncias são analisadas com base nos custos mínimos informados pela INRC(TL). O cálculo do GAP(%) entre os limites da literatura e do método nomeado como EE\_LAHC são obtidos por meio da [Equação 4.1](#).

Tabela 3 – Análise dos Custos (BILGIN et al., 2010)/EE\_LAHC

Instância	(BILGIN et al., 2010)	EE_LAHC	Média	Desvio Padrão	GAP (%)
sprint_early_01	57	76	77,80	7,30	25,00
sprint_early_02	59	76	78,08	7,64	22,37
medium_early_01	242	361	378,52	24,29	32,96
medium_early_02	241	349	372,31	24,60	30,95
medium_early_03	238	337	353,88	25,92	29,38
long_early_01	197	575	604,10	28,90	65,74

Fonte: elaborada pela autora

Tabela 4 – Análise dos Custos INRC/EE\_LAHC

Instância	INRC	EE_LAHC	Média	Desvio Padrão	GAP(%)
sprint_hidden_01	32	97	112,02	10,70	72,17
sprint_hidden_02	32	94	96,50	8,88	70,09
sprint_hidden_03	62	129	137,02	12,10	58,67

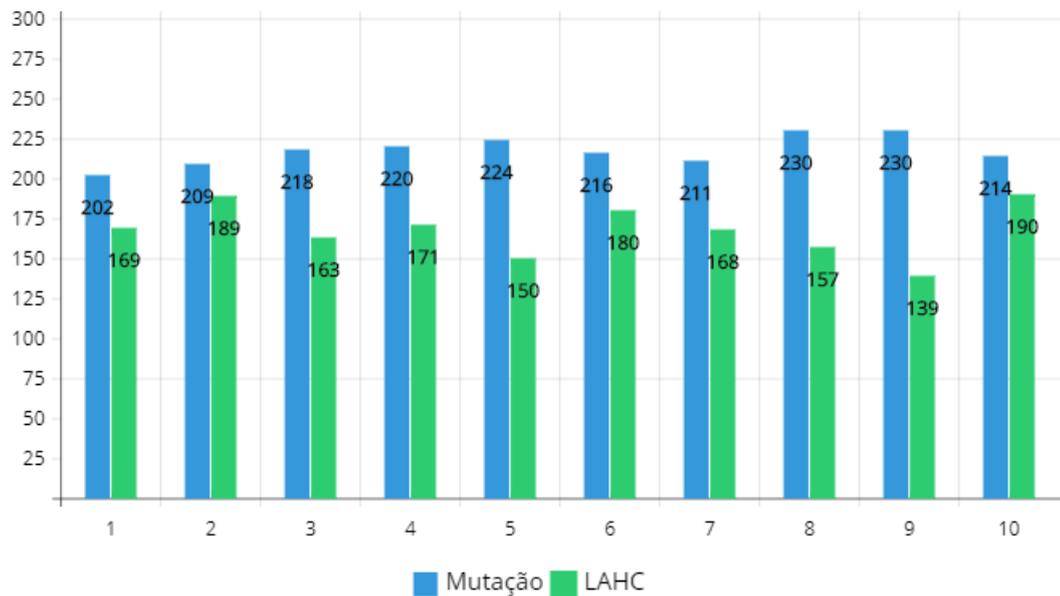
Fonte: elaborada pela autora

$$\frac{(EE\_LAHC) - TL}{(EE\_LAHC)} \times 100 \quad (4.1)$$

Com intuito de medir a dispersão de valores resultantes da abordagem, são apresentados o cálculo do valor médio e Desvio Padrão(DP) para cada instância nas tabelas citadas anteriormente. Para o cálculo foi levado em consideração o valor final das dez replicações de cada instância. As médias na faixa *sprint* mostram que os resultados finais das replicações não estiveram muito distantes entre si, tendendo a se aproximarem dos custos mínimos gerados pelo método EE\_LAHC. O desvio padrão para as instâncias dessa faixa confirmam que a dispersão dos resultados finais das replicações foi baixo.

As [Figura 9](#) e [10](#) apresentam gráficos com a evolução dos resultados após a submissão da solução ao LAHC. Os valores que correspondem as colunas indicam os custos das soluções candidatas referentes a instância *Sprint\_01* e caracterizam o refinamento dos indivíduos. Os dados que estão apresentados na [Figura 9](#) são de alguns descendentes da população inicial que estavam inclusos na probabilidade necessária para serem submetidos ao LAHC. A coluna azul é o custo do descendente após ser submetido ao operador de mutação e a coluna verde é o custo do indivíduo posterior a estratégia de busca Local.

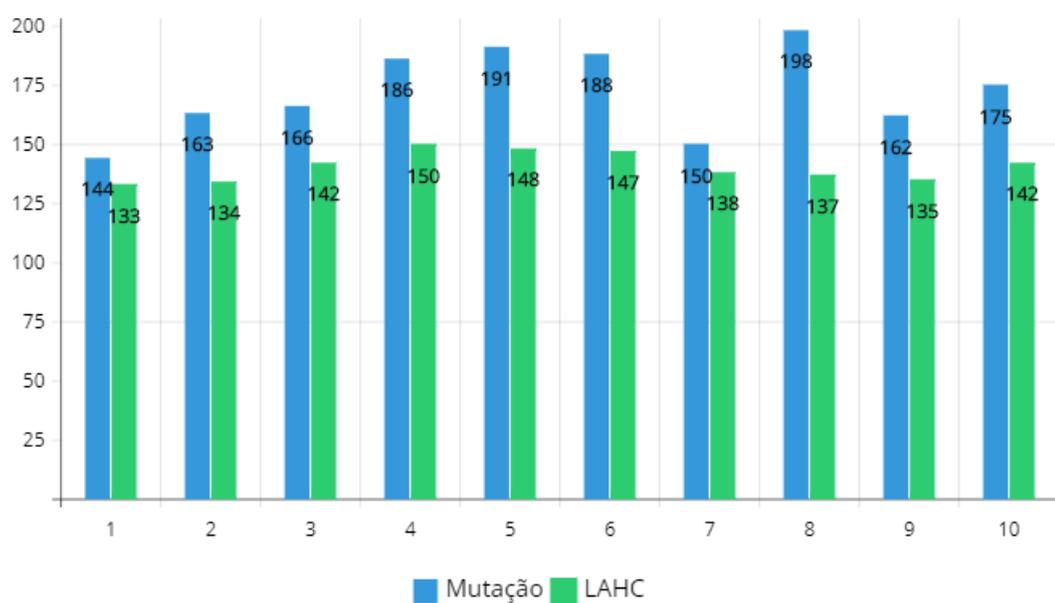
Figura 9 – Refinamento do Custo com a Busca Local - Solução Inicial



Os números de 1 a 10 representam dez indivíduos dentro da população que foram submetidos ao LAHC. Fonte: elaborada pela autora

A solução inicial é construída totalmente de modo aleatório, garantindo somente a factibilidade da solução. O operador de mutação juntamente com a estratégia de refinamento garantem a melhora do custo do descendente evidenciando o refinamento relevante da solução após a primeira geração. A representação dos resultados evidencia que a busca local mesmo com sua implementação simplificada melhora o custo da solução vigente na maioria dos casos. Com o intuito de enfatizar a melhora das soluções ocasionada pelo LAHC a geração seguinte é caracterizada na [Figura 10](#), em que expõe alguns indivíduos dentro do horizonte de descendentes gerados pela população sobrevivente e ilustram que obtiveram melhoras significativas em suas soluções após os movimentos de vizinhança, bem como observado na figura anterior.

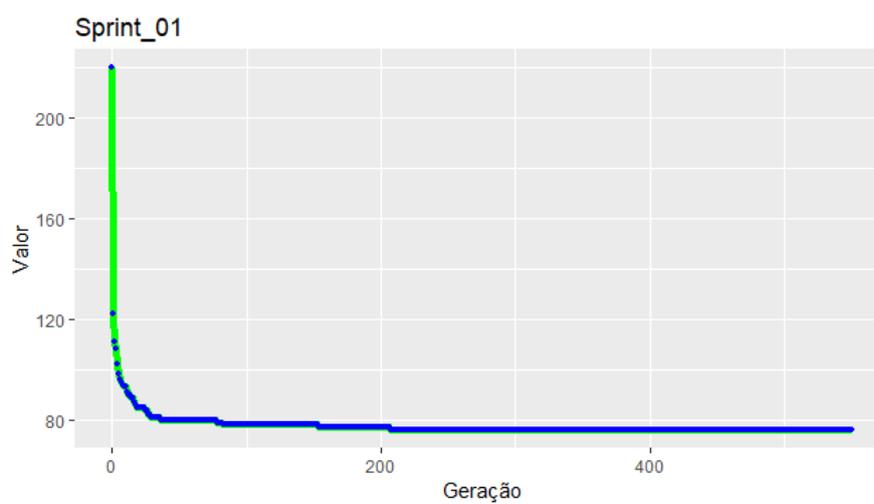
Figura 10 – Refinamento do Custo com a Busca Local



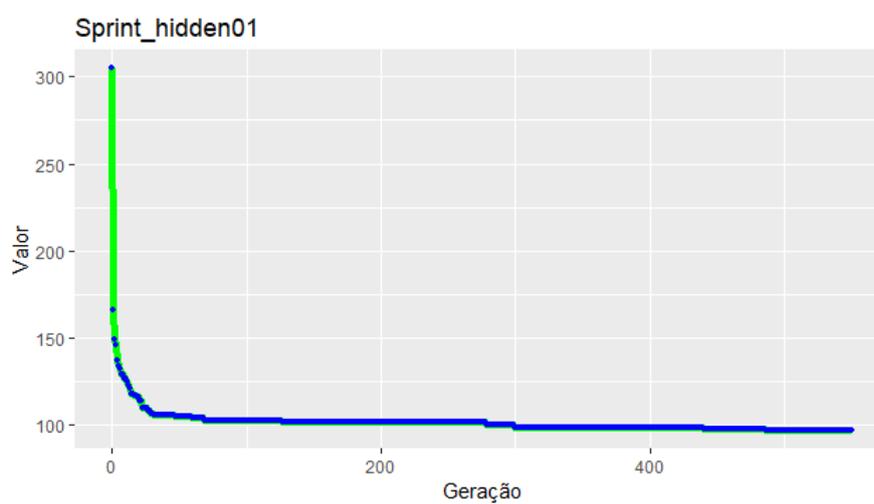
Os números de 1 a 10 representam dez indivíduos dentro da população que foram submetidos ao LAHC. Fonte: elaborada pela autora

As [Figura 11](#) e [12](#) representam todas as faixas das instâncias e explicita como a estratégia implementada é capaz de evoluir os resultados ao longo das gerações. Reafirmando a melhora significativa da solução inicial, os gráficos apresentam o salto realizado para a minimização dos valores da solução. Os movimentos de vizinhança permanecem gerando resultados minimizados até que se aproximem do limite de gerações.

Figura 11 – Gráfico de refinamento da solução ao longo das gerações



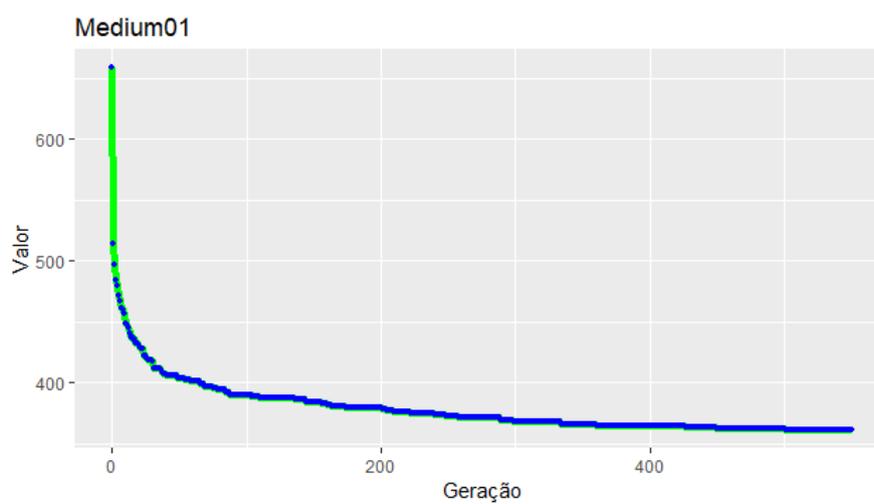
(a) Sprint\_01



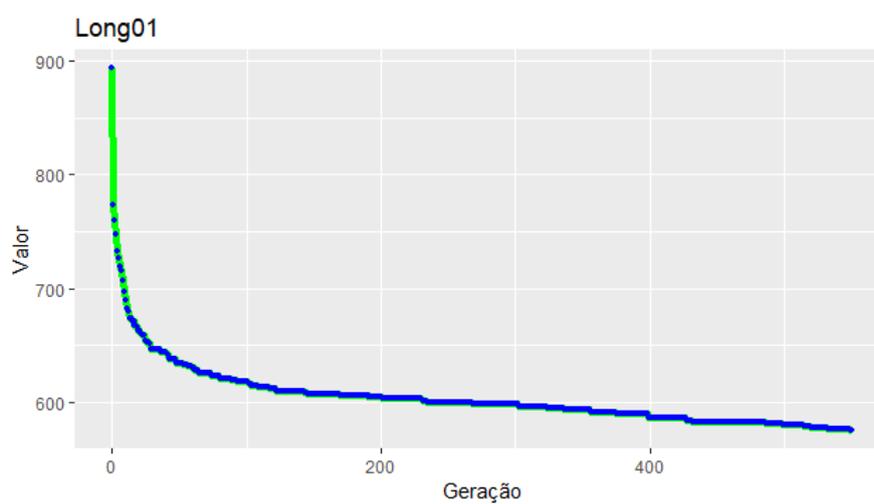
(b) Sprint\_hidden\_01

Fonte: elaborada pela autora

Figura 12 – Gráfico de refinamento da solução ao longo das gerações



(a) Medium\_01



(b) Long\_01

Fonte: elaborada pela autora

### 4.3 Discussão dos resultados

Conforme apresentado nas [Tabela 3](#) e [4](#), os resultados do presente trabalho foram comparados com estado da arte da literatura. O trabalho de [Bilgin et al. \(2010\)](#), um dos cinco finalistas da competição, foi escolhido para a comparação, em detrimento do primeiro classificado, pois a estratégia de solução adotada ao problema é a que mais se assemelha à do trabalho aqui desenvolvido. Para as instâncias que não foram abordadas por [Bilgin et al. \(2010\)](#) foi considerado o melhor resultado obtido na competição ([Tabela 4](#)).

Apesar das estratégias evolutivas aqui desenvolvidas serem capazes de melhorar significativamente as soluções iniciais ([Figura 11](#) e [12](#)), os resultados finais foram inferiores quando comparados aos do estado da arte da literatura. Tal desempenho se justifica pelos seguintes motivos:

- (i) A solução proposta nesse trabalho emprega apenas uma estratégia de mutação, que é muito simples comparada com a complexa estrutura de multi-operadores de mutação adotada por [Bilgin et al. \(2010\)](#);
- (ii) Não foi implementado no presente trabalho o cálculo parcial de função objetivo. A mutação adotada afeta apenas uma pequena porção da solução; assim, não é necessário recalcular toda a função objetivo novamente, e sim apenas a parte afetada da solução. Tal estratégia economizaria uma considerável quantia de tempo de processamento que poderia ser usada para explorar melhor o espaço de busca;
- (iii) O formato de entrada e a especificação do problema são de elevada complexidade. Levou-se um tempo considerável para entender e programar métodos para processar as entradas e avaliar a função objetivo, o que comprometeu o tempo disponível no trabalho para o estudo de estratégias e operadores mais efetivos para o problema.

## 5 Conclusão

Este trabalho apresentou técnicas de Computação Evolucionária para o Problema de Escalonamento de Enfermeiros. Ainda que neste cenário existam vários trabalhos e resultados publicados, em que cada um se distingue por suas características individuais e diversos métodos de aplicação de heurísticas, acredita-se que para uma avaliação de eficácia das heurísticas empregadas, a utilização de uma instância com valores de seus custos mínimos disponibilizados proporciona uma comparação e avaliação mais sensível.

A escolha por uma implementação híbrida considerada simples teve como intuito, verificar se modelos simplificados geraram resultados satisfatórios. Com os testes foi possível observar que o critério de parada *timeout* adotado pela competição, em que o tempo varia de acordo com a faixa, não favorece a avaliação do método desenvolvido. O método consome um tempo de execução que desfavorece o *timeout* como critério de parada. Alguns trabalhos correlacionados utilizaram ferramentas com intuito de auxiliar na resolução otimizando o tempo, mas devido ao objetivo da monografia nenhuma ferramenta terceirizada foi incorporada a implementação. Como consequência optou-se em adotar como critério de parada a quantidade de gerações, pois assim permitiria uma melhor análise do EE\_LAHC.

A proposta construída foi comparada com a proposta adotada por uma das equipes finalistas da INRC, que tem em sua composição pesquisadores envolvidos na área de otimização à vários anos, o que fundamenta a diferença nos resultados encontrados pela abordagem apresentada. Contudo, a heurística proposta construída sobre a formulação apresentada, garante a avaliação correta do custo da solução, uma vez que foi realizada a verificação do custo da função objetivo com o uso do Avaliador disponibilizado pela competição. A estrutura de construção da solução inicial e a maneira de manipular os dados, garantem que a solução seja considerada sempre factível.

A abordagem provou ser eficiente ao melhorar os custos das soluções ao longo da execução. A evolução dos custos deram continuidade ao longo da execução, mas encontra estagnada após atingir uma média de gerações, pois outros movimentos de busca local não foram incorporados.

O EE\_LAHC implementou um simples operador que permite encontrar soluções factíveis para o problema e, de fato, reduzir o custo(FO). O método é passível de possibilidades de continuidade e melhora, com a incorporação de outros operadores mais elaborados que podem melhorar ainda mais as soluções, reduzindo o GAP entre as melhores soluções encontradas na literatura. Sua execução esteve limitada a um equipamento que não foi otimizado para tal tarefa, em virtude que este não estava dedicado exclusivamente para a finalidade apresentada. Contudo, mais pesquisas podem ser efetuadas uma vez que não

foi explorado um número maior de possibilidades, pois tal prática fugiria do escopo da monografia.

## 5.1 Trabalhos futuros

Com a capacidade do método EE\_LAHC melhorar seu desempenho, como trabalhos futuros, pretende-se:

- armazenar as informações de custo dos funcionários individualmente, a fim de reduzir o custo de processamento com o cálculo da função objetivo. Em consequência de tal função ser extremamente utilizada ao longo do método, o armazenamento do custo por funcionários possibilitaria a minimização do processamento e do tempo gasto com o cálculo, visto que só seria realizado a avaliação nos funcionários que sofreram modificações.
- propor a execução paralela de funções, como modo de otimizar o tempo necessário para execução dos processos envolvidos no método EE\_LAHC. O paralelismo poderia ser aplicado no processo de geração de descendentes.
- estudar a incorporação de outros movimentos mais elaborados de vizinhança ao modelo apresentado, com o propósito de explorar melhor o espaço da solução e tratar a ocorrência de mínimos locais.

## Referências

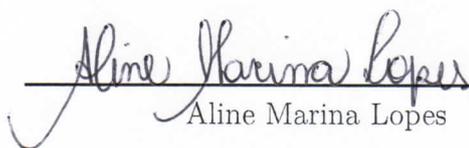
- BILGIN, B. et al. A hyper-heuristic combined with a greedy shuffle approach to the nurse rostering competition. In: *Proceedings of the 8th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling (PATAT'10)*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 6 vezes nas páginas 11, 22, 24, 44, 45 e 50.
- BOAVENTURA, R. S.; PINTO, B. Q.; YAMANAKA, K. Utilizando técnicas de algoritmo genético para resolução do problema de geração de grade horária para enfermarias. Conferência IADIS Ibero-Americana Computação Aplicada, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 21.
- BORBA, N. A. d. S. *Uma Solução do Problema de Programação de Equipes de Saúde Pública Via Metaheurísticas*. Tese (Doutorado) — Centro Educacional de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2010. Citado na página 23.
- BURKE, E. et al. Variable neighborhood search for nurse rostering problems. In: *Metaheuristics: computer decision-making*. [S.l.]: Springer, 2003. p. 153–172. Citado na página 19.
- BURKE, E. K.; BYKOV, Y. The late acceptance hill-climbing heuristic. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 258, n. 1, p. 70–78, 2017. Citado na página 37.
- CAUSMAECKER, P. D.; BERGHE, G. V. Novel meta-heuristic approaches to nurse rostering problems in belgian hospitals. 2004. Citado na página 20.
- CONSTANTINO, A. A. et al. Um algoritmo heurístico para otimização do problema de escalonamento de enfermeiros. 2009. Citado na página 19.
- COREN. *Coren*. 2011. Disponível em: <<http://www.coren-df.gov.br/site/no-0052011/>>. Citado na página 19.
- DOWSLAND, K. A. Nurse scheduling with tabu search and strategic oscillation. *European journal of operational research*, Elsevier, v. 106, n. 2-3, p. 393–407, 1998. Citado na página 14.
- ECONOMIAS. *Economias*. 2016. Disponível em: <<https://www.economias.pt/trabalho-por-turnos/>>. Citado na página 19.
- FOURATI, Z.; JERBI, B.; KAMMOUN, H. Planning and modeling nurse timetabling at an intensive care unit in a tunisian university hospital. 2016. Citado na página 18.
- FURTADO, J. C.; VARREIRA, L. D. A. Otimização de escala de horários de equipes de enfermagem através da simulação discreta em hospital do vale do rio pardo. *Anais do Salão de Ensino e de Extensão*, p. 377, 2013. Citado na página 19.
- GOMES, R. A. M. Técnicas de programação inteira para o problema de escalonamento de enfermeiras. Programa de Pós-Graduação em Ciência da Computação. Departamento de Ciência da Computação, Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto., 2012. Citado na página 18.

- GOODMAN, M. D.; DOWSLAND, K. A.; THOMPSON, J. M. A grasp-knapsack hybrid for a nurse-scheduling problem. *Journal of Heuristics*, Springer, v. 15, n. 4, p. 351–379, 2009. Citado na página 14.
- HASPESLAGH, S. et al. First international nurse rostering competition 2010 (august 10-13, 2010, belfast, uk). In: *PATAT 2010-Proceedings of the 8th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling, Belfast, Northern-Ireland, UK*. [S.l.: s.n.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 27.
- JAN, A.; YAMAMOTO, M.; OHUCHI, A. Evolutionary algorithms for nurse scheduling problem. In: IEEE. *Evolutionary Computation, 2000. Proceedings of the 2000 Congress on*. [S.l.], 2000. v. 1, p. 196–203. Citado 3 vezes nas páginas 14, 23 e 24.
- KRIPKA, R.; KRIPKA, M.; SILVA, M. d. Formulação para o problema de alocação de salas de aula com minimização de deslocamentos." *XLIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*", Ubatuba, SP. *Anais do XLIII SBPO*, 2011. Citado na página 18.
- KULEUVEN. *Nurse Rostering Competition*. 2010. Disponível em: <<https://www.kuleuven-kulak.be/nrpscompetition>>. Citado 3 vezes nas páginas 18, 41 e 44.
- MÜLLER, T.; BARTÁK, R. Interactive timetabling: Concepts, techniques, and practical results. In: *PATAT*. [S.l.: s.n.], 2002. p. 58–72. Citado na página 18.
- PETROVIC, S.; BERGHE, G. V. Comparison of algorithms for nurse rostering problems. In: *Proceedings of the 7th International Conference on the Practice and Theory of Automated Timetabling*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–18. Citado na página 14.
- POLTOSI, M. R. Elaboração de escalas de trabalho de técnicos de enfermagem com busca tabu e algoritmos genéticos. 2007. Citado na página 15.
- POLTOSI, M. R. Elaboração de escalas de trabalho de técnicos de enfermagem com busca tabu e algoritmos genéticos. Universidade do Vale do Rio do Sinos, 2007. Citado na página 19.
- RIBEIRO, V. G. et al. Simulated annealing e sistema multiagente na abordagem de timetabling aplicada ao escalonamento de veículos de transporte público. *Revista de Sistemas e Computação-RSC*, v. 4, n. 1, 2014. Citado na página 18.
- SANTOS, H. G. et al. Heurísticas e programação inteira para o problema das enfermeiras. 2012. Citado na página 14.
- SANTOS, I. C. *Problema do Escalonamento de Enfermeiros*. [S.l.], 2006. Citado na página 15.
- VALOUXIS, C. et al. A systematic two phase approach for the nurse rostering problem. *European Journal of Operational Research*, Elsevier, v. 219, n. 2, p. 425–433, 2012. Citado 4 vezes nas páginas 14, 21, 22 e 24.
- YAMAMOTO, M.; KAWAMURA, H.; OHUCHI, A. Collective approach to optimization problems. In: *Proceedings of ITC-CSCC*. [S.l.: s.n.], 1998. v. 98, p. 1479–1482. Citado na página 24.
- ZUBEN, F. J. V. Computação evolutiva: uma abordagem pragmática. *Tutorial: Notas de Aula da disciplina IA707, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação-Universidade Estadual de Campinas*, 2000. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 36.

## TERMO DE RESPONSABILIDADE

Eu, **Aline Marina Lopes** declaro que o texto do trabalho de conclusão de curso intitulado “*Computação evolucionária aplicada ao Problema de Geração de Escala de Enfermeiros*” é de minha inteira responsabilidade e que não há utilização de texto, material fotográfico, código fonte de programa ou qualquer outro material pertencente a terceiros sem as devidas referências ou consentimento dos respectivos autores.

João Monlevade, 17 de julho de 2018

  
Aline Marina Lopes

## ANEXO IX – DECLARAÇÃO DE CONFORMIDADE

Certifico que a aluna **Aline Marina Lopes**, autora do trabalho de conclusão de curso intitulado “**Computação evolucionária aplicada ao Problema de Geração de Escala de Enfermeiros**” efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

João Monlevade, 13 de agosto de 2018.



Fernando Bernardes de Oliveira