

**PUC CAMPINAS**  
**Mestrado em Engenharia Elétrica**

**Otimização multicritério para roteirização de serviços de uma  
distribuidora de energia elétrica**

**Guilherme Valentim Cândido**

Dissertação apresentada para obtenção do título de  
Mestre em Engenharia Elétrica

**Campinas**  
**2020**

**GUILHERME VALENTIM CANDIDO**

**OTIMIZAÇÃO MULTICRITÉRIO PARA ROTEIRIZAÇÃO  
DE SERVIÇOS DE UMA DISTRIBUIDORA DE ENERGIA  
ELÉTRICA**

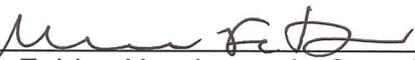
Dissertação apresentada como exigência para obtenção do título de Mestre em Gestão de Redes de Telecomunicações ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias.

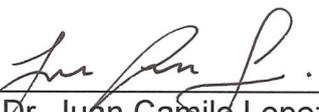
Área de Concentração: Engenharia Elétrica.  
Orientadora: Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira.

Co-orientadora: Profa. Dra. Lia Toledo Moreira Mota.

Dissertação defendida e aprovada em 30 de janeiro de 2020 pela Comissão Examinadora constituída dos seguintes professores:

  
\_\_\_\_\_  
Profa. Dra. Marina Lavorato de Oliveira  
Orientadora da Dissertação e Presidente da Comissão Examinadora  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Marcio Fabius Henriques de Carvalho  
Pontifícia Universidade Católica de Campinas

  
\_\_\_\_\_  
Prof. Dr. Juan Camilo Lopez Amezquita  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Ficha catalográfica elaborada por Vanessa da Silveira CRB 8/8423  
Sistema de Bibliotecas e Informação - SBI - PUC-Campinas

519.64  
C217o

Candido, Guilherme Valentim

Otimização multicritério para roteirização de serviços de uma distribuidora de energia elétrica / Guilherme Valentim Candido. - Campinas: PUC-Campinas, 2020.

103 f.: il.

Orientador: Marina Lavorato de Oliveira.

Dissertação (Mestrado em Gestão de Redes de Telecomunicações) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas, 2020.

Inclui bibliografia.

1. Otimização combinatória. 2. Energia elétrica - Distribuição. 3. Engenharia elétrica. I. Oliveira, Marina Lavorato de. II. Pontifícia Universidade Católica de Campinas. Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. III. Título.

CDD - 22. ed. 519.64

## **AGRADECIMENTOS**

À minha esposa Paula e à Rita pelo companheirismo e paciência, à minha família pela torcida, à minha orientadora Marina pelo suporte e disponibilidade, à PUC CAMPINAS por todas os conhecimentos e condições ofertadas e à CPFL pelo incentivo.

## SUMÁRIO

	Sumário . . . . .	4
	Lista de Tabelas . . . . .	6
	Lista de Figuras . . . . .	7
	Resumo . . . . .	9
	Abstract . . . . .	10
1	Introdução . . . . .	11
1.1	Contextualização . . . . .	11
1.2	Objetivo e Justificativa . . . . .	15
1.3	Revisão Bibliográfica . . . . .	17
2	Fundamentação Teórica . . . . .	21
2.1	Programação linear inteira . . . . .	21
2.1.1	Heurísticas de busca local . . . . .	21
2.2	Meta-heurísticas e Busca Tabu . . . . .	24
2.2.1	Método Busca Tabu . . . . .	24
2.3	Métodos de Análise de decisão multicritério . . . . .	26
2.3.1	Analytic Hierarchy Process (AHP) . . . . .	27
2.3.1.1	Etapa de estruturação do problema . . . . .	28
2.3.1.2	Etapa de comparação entre pares de critérios . . . . .	28
2.3.1.3	Cálculo do autovetor e autovalor da matriz de comparações . . . . .	29
2.3.1.4	Etapa de verificação de consistência . . . . .	29
2.3.1.5	Etapa de análise de sensibilidade . . . . .	29
2.3.2	Método PROMETHEE II . . . . .	30
2.3.2.1	Cálculo de fluxos unilaterais . . . . .	32
2.3.2.2	Cálculo de fluxos globais e funções de preferência . . . . .	32
2.3.3	Utilizações combinadas de métodos decisórios . . . . .	33
3	Metodologia . . . . .	35
3.1	Codificação do problema . . . . .	35
3.1.1	Representação Espacial . . . . .	35
3.1.2	Modelagem de variáveis . . . . .	37
3.1.3	Restrições e considerações . . . . .	38
3.1.4	Modelos temporais e de distância . . . . .	39
3.2	Modelo #1: Minimização das distâncias percorridas . . . . .	39
3.2.1	Heurística para solução do problema de minimização de distâncias . . . . .	40
3.3	Modelo #2: Minimização do custo global de atendimento . . . . .	48
3.3.1	Métodos decisórios aplicados à priorização de serviços de uma distribuidora de energia . . . . .	49
3.3.2	Critérios definidos para avaliação e comparação . . . . .	50

3.3.2.1	Critério quantidade de clientes interrompidos . . . . .	50
3.3.2.2	Critério EUSD total . . . . .	51
3.3.2.3	Critério localização . . . . .	52
3.3.2.4	Critério quantidade de clientes críticos . . . . .	52
3.3.2.5	Critério tempo de atendimento de uma ocorrência emer- gencial . . . . .	53
3.3.2.6	Critério evento de risco . . . . .	54
3.3.2.7	Critério tempo de vencimento de serviços do Anexo III . .	54
3.3.3	Utilização de métodos decisórios e ordenação global de serviços . .	55
3.3.3.1	Exemplo de aplicação computacional do método decisório híbrido desenvolvido . . . . .	57
3.3.4	Pesquisa e questionário de priorização com agentes do setor . . . .	65
3.3.5	Aplicação de Busca Tabu para minimização do custo global . . . .	71
3.3.5.1	Implementação na modelagem computacional . . . . .	71
3.3.5.2	Desenvolvimento da meta-heurística . . . . .	72
3.3.5.3	Lógica computacional e Lista Tabu . . . . .	74
4	Resultados . . . . .	81
4.1	Resultados de simulações do Modelo #1 . . . . .	81
4.2	Resultados de simulações do Modelo #2 . . . . .	87
4.2.1	Simulação 35 notas de serviço . . . . .	87
4.2.2	Simulação 60 notas de serviço . . . . .	92
4.3	Comparativo entre modelos . . . . .	96
5	Conclusão . . . . .	99
5.1	Trabalhos futuros . . . . .	100
6	Bibliografia . . . . .	101
	Referências . . . . .	101

## LISTA DE TABELAS

2.1	Métodos decisórios e aplicações . . . . .	27
2.2	Escala fundamental de Saaty 1-9 . . . . .	28
2.3	Índices aleatórios por dimensão . . . . .	29
3.1	Seleção de critérios para definição de árvore de comparação do método AHP	59
3.2	Lista de critérios e respectivos pesos normalizados . . . . .	59
3.3	Matriz de atributos de simulação de 15 notas de serviço . . . . .	60
3.4	Lista de serviços e respectivos pesos pós método PROMETHEE . . . . .	62
3.5	Lista de serviços e respectivos pesos ponderados . . . . .	63
3.6	Matriz exemplo de comparação entre critérios . . . . .	65
3.7	Resultado da comparação - Quantidade de Clientes Interrompidos x Quantidade de Clientes Críticos . . . . .	68
3.8	Resultado da comparação - Tempo de Vencimento de Serviço do Anexo III x Tempo de Atendimento . . . . .	68
3.9	Comparação de critérios resultante da pesquisa . . . . .	69
3.10	Método AHP aplicado a pesquisa com agentes . . . . .	69
3.11	Ajuste de consistência resultante da pesquisa . . . . .	70
3.12	Resultado do método AHP após ajustes de consistência . . . . .	71
3.13	Faixa de valores dos critérios para modelagem . . . . .	72
3.14	Pesos para critérios utilizados na simulação . . . . .	77
4.1	Resultado do método AHP após ajustes de consistência . . . . .	87
4.2	Comparativo entre modelos para $D_{ii} = 0$ . . . . .	96
4.3	Comparativo entre modelos para $D_{ii} = 250$ . . . . .	97
4.4	Comparativo entre modelos para $D_{ii} = 500$ . . . . .	97

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro . . . . .	11
1.2	Exemplo de processo de tomada de decisão por prioridade . . . . .	14
1.3	Possibilidade de rotas para atendimento de serviços . . . . .	16
2.1	Classificação de abordagens de métodos heurísticos . . . . .	22
2.2	Exemplo do processo de clusterização . . . . .	23
2.3	Modelo simplificado de hierarquia de critérios . . . . .	28
2.4	Seis tipos de funções de preferência . . . . .	31
3.1	Localização real de EA e notas de serviço . . . . .	36
3.2	Exemplo de plotagem de 15 notas em eixo cartesiano . . . . .	37
3.3	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento . . . . .	41
3.4	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Divisão inicial em quatro <i>clusters</i> para atendimento . . . . .	42
3.5	Sequência de decisões do processo de busca pelo vizinho mais próximo . . . . .	43
3.6	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Solução original do problema . . . . .	44
3.7	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Resultado da primeira iteração . . . . .	45
3.8	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Resultado da segunda iteração . . . . .	46
3.9	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Melhor solução do problema . . . . .	47
3.10	Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração . . . . .	48
3.11	Fluxograma simplificado de dados entre processos AHP e PROMETHEE II . . . . .	56
3.12	Fluxograma simplificado global de entradas e saídas dos métodos . . . . .	57
3.13	Simulação de ranqueamento de 15 notas de serviço . . . . .	58
3.14	Simulação de ranqueamento de 15 notas de serviço . . . . .	59
3.15	Histograma simplificado da distribuição direcionada do critério quantidade de clientes interrompidos . . . . .	61
3.16	Resultado gráfico do processo de ponderação de pesos . . . . .	64
3.17	15 notas em plano cartesiano com prioridades quantificadas e comparáveis . . . . .	64
3.18	Boxplot comparação entre pares de critérios - Parte 1 . . . . .	66
3.19	Boxplot comparação entre pares de critérios - Parte 2 . . . . .	67
3.20	Exemplo comparação algoritmos de otimização de distância e otimização por criticidade das notas de serviço . . . . .	76
3.21	Representação de 40 notas de serviço para simulação . . . . .	78
3.22	Simulação com 40 notas e 4 equipes: evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	78

3.23	Representação da permanência das iterações por giro angular . . . . .	79
3.24	Representação da melhor solução da simulação com 40 notas de serviço e 4 veículos . . . . .	79
4.1	Representação de 35 notas de serviço para simulação . . . . .	82
4.2	Exemplo 35 notas / 5 veículos. Divisão inicial em <i>clusters</i> para atendimento . . . . .	82
4.3	Simulação 35 notas: Solução original do problema . . . . .	83
4.4	Simulação 35 notas: Melhor solução do problema . . . . .	83
4.5	Simulação 35 notas: Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração . . . . .	84
4.6	Representação de 60 notas de serviço para simulação . . . . .	84
4.7	Simulação 60 notas: Divisão inicial em <i>clusters</i> para atendimento . . . . .	85
4.8	Simulação 60 notas: representação da solução original . . . . .	85
4.9	Simulação 60 notas: representação da melhor solução . . . . .	86
4.10	Simulação 60 notas: Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração . . . . .	86
4.11	Representação de 35 notas de serviço para simulação . . . . .	88
4.12	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 0$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	89
4.13	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 0$ : representação da melhor solução . . . . .	89
4.14	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 250$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	90
4.15	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 250$ : representação da melhor solução . . . . .	90
4.16	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 500$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	91
4.17	Simulação 35 notas com $D_{ii} = 500$ : representação da melhor solução . . . . .	91
4.18	Representação de 60 notas de serviço para simulação . . . . .	92
4.19	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 0$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	93
4.20	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 0$ : representação da melhor solução . . . . .	93
4.21	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 250$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	94
4.22	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 250$ : representação da melhor solução . . . . .	94
4.23	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 500$ : evolução da função objetivo e da incumbente . . . . .	95
4.24	Simulação 60 notas com $D_{ii} = 500$ : representação da melhor solução . . . . .	95

## RESUMO

### Otimização multicritério para roteirização de serviços de uma distribuidora de energia elétrica

A tarefa diária de priorização de serviços de campo de um distribuidora de energia elétrica bem como a utilização ótima das equipes é um desafio real e muito complexo. Variáveis subjetivas e qualitativas dificultam a priorização e uma visão global de roteiros de despacho. Este trabalho propõe o desenvolvimento de um algoritmo para resolução de um problema de otimização combinatória multicritério que trata da roteirização de serviços comerciais e emergenciais de uma distribuidora de energia elétrica.

Para caracterização do problema, foram levantados sete critérios principais selecionados de forma a caracterizar de forma abrangente todos os aspectos relacionados tanto a desligamentos emergenciais involuntários na rede de energia como também serviços comerciais definidos em regulação específica do setor. Para avaliação de criticidade e priorização, foram utilizados os métodos decisórios AHP e PROMETHEE II associados a pesquisas anônimas realizadas junto a agentes do setor e da academia que exprimem as experiências individuais e percepções de priorização.

Em um primeiro modelo, foi desenvolvido um algoritmo auxiliar responsável pela otimização de distâncias percorridas pelos veículos em diferentes cenários de despacho. Para isto, foram utilizadas de forma combinada a heurística de Busca do Vizinho mais Próximo acoplada à heurística de Gillet e Miller. Em seguida, para resolução do problema multicritério, fez-se uso da lógica de separação em grupos a partir da heurística de Gillet e Miller juntamente com a meta-heurística Busca Tabu, resultando em uma meta-heurística com recursos de um método multicritério híbrido. Esta simulação multicritério compõe o segundo modelo.

Os resultados obtidos derivam de simulações em ambos modelos, de otimização de distância e do custo global de atendimento (representado pela função objetivo multi-critério), cenários de despacho variando quantidade de notas de serviço a serem atendidas, assim como equipes disponíveis para roteamento. Somado a isto, são realizadas simulações cruzadas entre modelos, para identificação do impacto de um resultado de uma otimização por distância em um modelo de otimização multicritério e vice-versa.

**Palavras-chave:** 1. Otimização Combinatória 2. Distribuição de Energia Elétrica 3. Busca Tabu 4. Problemas de roteirização 5. Métodos Heurísticos 6. AHP 7. PROMETHEE II

## ABSTRACT

### Multicriteria optimization of an electric utility's routing problem

The daily task of prioritizing electric distribution services as well as optimal team utilization is a real and very complex challenge. Subjective and qualitative variables make prioritization and an overview of dispatched routes difficult. This paper proposes the development of an algorithm for solving a multi-criteria combinatorial optimization problem that deals with the routing of commercial and emergency services of an electric distribution company.

In order to characterize the problem, seven selected criteria were raised in order to comprehensively characterize all aspects related to both emergency shut-downs in the power grid as well as commercial services defined in sector specific regulation. To evaluate criticality and prioritization, the AHP and PROMETHEE II decision-making methods associated with anonymous survey applied on academic and specialized agents that express individual experiences and perceptions of prioritization were used.

In a first model, an auxiliary algorithm was developed to optimize the distances traveled by vehicles in different dispatch scenarios. For this purpose, the Nearest Neighbor Search heuristic coupled with Gillet and Miller's heuristic were used. Then, to solve the multi-criteria problem, it was used the logic of group separation from the Gillet and Miller heuristic together with the Tabu Search metaheuristic, resulting in a meta-heuristic with the resources of a hybrid multi-criteria method.

The results are obtained from simulations of both distance optimization and overall cost of service models (represented by the multi-criteria function), dispatch scenarios varying the number of service to be attended, as well as teams available for routing. In addition, cross-model simulations are performed to identify the impact of a distance optimization result on a multi-criteria optimization model and vice versa.

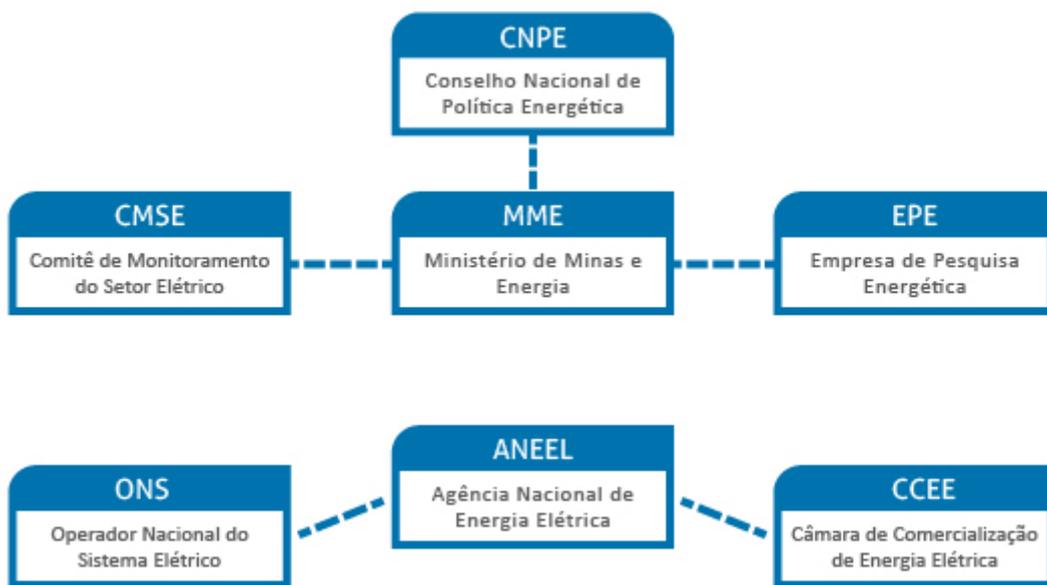
**Keywords:** 1. Combinatorial Optimization 2. Electric Distribution 3. Tabu Search 4. Routing problem 5. Heuristic Methods 6. AHP 7. PROMETHEE II

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A partir da crise do setor elétrico brasileiro de 2001, houve uma grande reforma no modelo regulatório do mesmo. Dentre as mudanças, uma das principais foi a separação completa dos agentes externos do setor em quatro classes diferentes: Geradoras, Transmissoras, Distribuidoras e Comercializadoras (Tolmasquim, 2011). Aliados a órgãos centrais de controle estatal ou de direito privado, como a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE), a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e o ONS (Operador Nacional do Sistema), todos estes elementos trabalhando de forma conjunta se tornariam responsáveis pela operação e expansão de todo o Sistema Interligado Nacional (SIN).

**Figura 1.1.** Estrutura do Setor Elétrico Brasileiro



Fonte: CCEE

Neste novo modelo, as Distribuidoras de Energia seriam responsáveis por, dentre outras atribuições, garantir o fornecimento de energia com continuidade e qualidade aos consumidores conectados às redes de distribuição. Sua remuneração foi definida, em suma, por parcelas que remuneram investimentos realizados de forma prudente nas redes de distribuição, bem como uma remuneração fixa para custos definidos como despesas, classificados no modelo como *Operational Expenditure* (OPEX) Regulatório. Esta segunda segue uma metodologia de benchmarking comparativo, onde empresas mais eficientes se tornam referências para as demais.

Do ponto de vista do negócio de distribuição energia, este modelo sinaliza para os concessionários diretrizes de maximização de investimentos em redes de distribuição e minimização de custos operacionais. O primeiro grupo de remuneração, a partir de investimentos na rede, caso realizado de forma prudente, é totalmente remunerado pela metodologia, enquanto o segundo grupo, associado ao OPEX regulatório, é limitado ao *benchmarking* do grupo em que cada empresa pertence. A metodologia de remuneração das distribuidoras de energia, denominada ANEEL (2015), foi desenvolvida como mecanismo regulador e compreende todas as regras de remuneração das empresas do setor. A partir da criação deste cenário, políticas e projetos de aumento de eficiência se tornam frequentes nas distribuidoras de todo o país.

Ainda em relação às distribuidoras, o atual modelo regulatório define o escopo do trabalho das empresas que detém concessões geográficas com obrigatoriedade de atendimento a serviços comerciais e emergenciais. Dentre os serviços ofertados pela distribuidora, alguns possuem prazos regulados, conforme ANEEL (2010). Dentre eles, os mais fiscalizados pela ANEEL são os pertencentes ao Anexo III da Resolução Normativa 414 (ANEEL, 2010). Pertencem a este grupo serviços de vistoria de padrão de energia, religação em caso de desconexão por falta de pagamento, verificação de equipamento em processo de ressarcimento de dano elétrico, etc. Estes serviços, ainda que não tenham programação de agendamento obrigatória, têm prazos curtos, alguns chegando a horas, exigindo uma programação por parte da distribuidora de horas ou poucos dias. Ainda tratando de serviços técnicos e comerciais, existe um rol de serviços mapeados para execução que surgem internamente pela própria distribuidora. Se tratam de serviços de desconexão de consumidores, fiscalizações de fraudes, manutenção de rede, entre outros. Estes serviços, ao contrário dos tidos como regulados, trazem ganhos posteriores financeiros (caso de desconexões e fiscalizações) e operacionais (caso de manutenções). Estes serviços são mapeados na regulação e, especialmente serviços de desconexão e fiscalização, têm regras restritivas de execução em campo (vide ANEEL (2010)).

Em outra vertente, estão os atendimentos emergenciais, que são definidos em ANEEL (2007a) como *Atendimento de emergência provocado por um único evento que gere deslocamento de equipes, inclusive aquela considerada improcedente*. Ainda que seja possível desenvolver metodologias de predição, vide da Silva et al. (2017), dada a sazonalidade das incidências (correlação direta com períodos chuvosos), não é possível estabelecer com precisão requisitos para atendimentos não-programados previstos para determinado período.

As redes de distribuição de energia elétrica no Brasil são predominantemente aéreas e estão muito mais sujeitas a defeitos de causas naturais ou com ação humana do que redes subterrâneas. Somado a isto, o nível de automação de equipamentos de rede para possibilidade de redução ou mitigação de deslocamentos de equipes é baixo de modo geral, sendo necessário a alocação de uma equipe de eletricitas para verificação dos

possíveis defeitos na rede elétrica fisicamente no local.

As ocorrências emergenciais são também embutidas de critérios de contabilização para formação de índices de qualidade e ressarcimento ao consumidor em caso de constatação de falta de energia. Os principais índices técnicos que regem uma distribuidora são os chamados Duração Equivalente de Interrupção (DEC) e Frequência equivalente de interrupção (FEC), que serão definidos posteriormente.

Estes indicadores são os principais na avaliação do desempenho de uma distribuidora de energia elétrica. A ANEEL define anualmente limites técnicos a serem cumpridos por cada distribuidora, tanto para DEC quanto para FEC. Estes limites globais são calculados a partir da composição de padrões individuais de cada Conjunto Elétrico ANEEL (2007b) que compõe a distribuidora. Por sua vez, os padrões individuais dos conjuntos são definidos a partir de uma metodologia de benchmarking comparativa a partir de atributos naturais (índice de vegetação, pluviometria, entre outros). A cada ano, a menos que o conjunto elétrico seja benchmarking para seu *cluster*, a metodologia exige a melhoria da qualidade percebida pelo consumidor, reduzindo os padrões anuais de DEC e FEC. Sabendo que o limite global de cada distribuidora é definido pela composição dos padrões individuais, naturalmente a meta global de cada distribuidora também decresce ao longo dos anos, obrigando as distribuidoras a buscarem melhorias contínuas de desempenho técnico.

Ainda que estejam relacionados, o DEC é influenciado diretamente pela logística de atendimento definido pela distribuidora responsável. Ocorrências emergenciais que impactam mais consumidores têm uma variação de DEC por intervalo de tempo maior que uma mesma ocorrência com menos consumidores. Esta definição indica uma predisposição para sequenciamento de despacho direcionado para ocorrências com maiores quantidades de consumidores envolvidos. Entretanto, outras variáveis que envolvem o despacho de ocorrências emergenciais podem alterar a priorização de atendimento. Outro índice importante que envolve atendimentos emergenciais trata do pagamento de compensações por continuidade de fornecimento.

Esta regra, definida em ANEEL (2007b), traduz o pagamento de compensações de continuidade por tempo interrompido a cada consumidor como uma função de seu Encargo de Uso do Sistema de Distribuição (EUSD), a sua classe de conexão, o tempo ou quantidade de vezes que ficou interrompido em um determinado período de tempo e o limite máximo regulatório permitido para cada classe de atendimento.

Em caso de violação dos valores permitidos em regulação, as multas por continuidade podem ser aplicadas considerando a apuração dos três indicadores individuais correspondentes à medição da qualidade do fornecimento: Duração de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DIC), Frequência de Interrupção Individual por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (FIC), Duração Máxima de Interrupção Contínua por Unidade Consumidora ou por Ponto de Conexão (DMIC)

e Duração da Interrupção Individual ocorrida em Dia Crítico por unidade consumidora ou por ponto de conexão (DICRI). A aplicação de compensação se dá apenas à maior violação financeira de um dos três primeiros indicadores (a contabilização de DICRI tem uma tratativa diferenciada).

Diariamente, distribuidoras de energia elétrica passam centenas de vezes por processos manuais de roteirização e priorização de serviços a serem executados. Ocorrências emergenciais, novas ordens de serviço comerciais e variação de equipes disponíveis para atendimento são algumas das variáveis que fazem parte do processo iterativo decisório diário dos operadores dos centros de operação. Para exemplificação, está indicado na figura 1.2 uma possibilidade de cenário de tomada de decisão.

**Figura 1.2.** Exemplo de processo de tomada de decisão por prioridade



Fonte: Autor

Neste exemplo, o objetivo é roteirizar três serviços distintos: atendimento de um bloco de consumidores interrompidos, cumprimento de prazo regulatório para ligação de uma grande indústria e o atendimento de um hospital com falta de energia. Os três serviços são prioritários em aspectos próprios, por exemplo: a prioridade do atendimento do bloco de clientes tem impacto nos indicadores técnicos globais da empresa, como o DEC, já o tempo para ligação de uma grande indústria afeta a imagem da companhia bem como no seu faturamento, já o atendimento ao hospital trata da responsabilidade de manter clientes críticos com maior prioridade de atendimento porque envolve serviços essenciais para a saúde da população e são altamente dependentes de energia elétrica.

Dado o cenário para atendimento e a limitação do recurso, o objetivo é: qual é a melhor rota para minimizar custos e prejuízos e que também maximize ganhos operacionais?

Além da necessidade de minimizar a rota a ser executada pelas equipes de campo, a natureza de serviços os diferencia em relação à prioridade e custo global de execução. Por exemplo, uma ordem emergencial com 5 clientes interrompidos é unilateralmente (em relação ao atributo consumidor interrompidos) preferencial a uma ordem com somente um consumidor interrompido. Por outro lado, as mesmas ordens são igualmente avaliadas pelo EUSD, variável com impacto direto no cálculo das compensações por continuidade, conforme ilustrado anteriormente. Em suma, a priorização entre serviços a serem executados, além de ser pautada na minimização dos deslocamentos das equipes, traz à tona elementos de complexa comparação e análise para priorização.

Conforme Guimarães et al. (2015), a previsibilidade da execução de serviços, tanto comerciais quanto emergenciais, é baixa a partir de modelos estatísticos, resultando em baixas correlações e alta variabilidade. Sendo assim, o horizonte de roteirização prévia é limitado aos serviços já existentes para execução de forma prévia e para abrangência total de mecanismos de despacho automático e deve-se modelar o ingresso em tempo real de novas ordens, sejam elas comerciais ou emergenciais.

O trabalho de roteirização para o caso é combinatório, linear e multi-objetivo. Ainda que na literatura existam trabalhos de roteirização a partir de heurísticas, como Ferreira et al. (2017), para a caracterização correta da natureza dos serviços executados é necessário alterar a função objetivo para que sejam consideradas as diversas naturezas dos serviços.

Porém, a modelagem é possível para ordens comerciais já existentes para atendimento, visto que muitas delas tem prazos superiores a um dia útil (ANEEL, 2010). Para solucionar a questão das ordens emergenciais, o problema será resumido de forma determinística, visando a capacidade de processamento para que minimize esforços de roteirização principalmente em relação ao tempo.

## 1.2 Objetivo e Justificativa

Transportar de forma matemática as mais diversas regras de prioridade do setor elétrico para um algoritmo de otimização elimina o fator subjetivo pessoal de necessidade de urgência. O objetivo geral deste trabalho é modelar e desenvolver um algoritmo que seja capaz de capturar o máximo possível de fatores e avaliar o problema de uma forma unificada a uma mesma base comparativa.

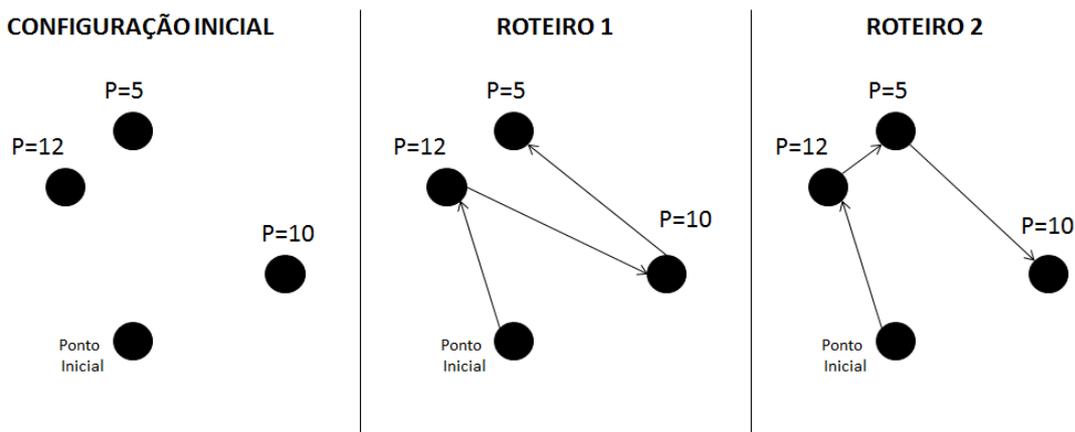
Entretanto, muitos critérios são subjetivos. É mais importante o atendimento a muitos clientes sem falta de energia ou uma grande indústria? Como avaliar caso a caso visto que nenhum deles é totalmente superior ao outro: o desligamento de muitos

clientes pode ser de um bairro a toda uma cidade e grande indústria pode ser desde uma supermercado relevante para uma região até a principal indústria de um polo fabril?

Para equalizar bases comparativas e remover a subjetividade do problema, serão utilizados métodos decisórios computacionais que, através de técnicas comparativas, poderão definir pesos numéricos para cada serviço a ser atendido. Além disto, estes pesos terão valor matemático, assim, será possível concluir se um serviço é 2, 3, 4 vezes mais significativo que outro ou vice-versa.

Definindo a escala de pesos, tem-se agora o problema logístico. Isto acontece porque os serviços disponíveis para atendimento não estão igualmente distribuídos geograficamente entre si. Uma distribuidora de energia, assim como qualquer empresa de serviço, deve estar preparada para atender demandas em quaisquer pontos de sua área de atuação (ou, especificamente do setor elétrico, área de concessão). Surge então a questão do aproveitamento de roteiro das equipes de atendimento, conforme figura 1.3. Este dilema traz à tona o fator distância para atendimento e um novo conceito de Custo Global de Atendimento surge: **Qual é o menor custo global possível com o recurso disponível para atendimento dos serviços pendentes de execução?**. Ainda avaliando a figura 1.3, cada serviço é classificado por um peso fictício e são indicadas duas possibilidades de execução de rota - a primeira priorizando somente o valor dos pesos, consequentemente com oneração da rota (a distância percorrida total será maior), e a segunda priorizando uma avaliação híbrida entre distância total e pesos.

**Figura 1.3.** Possibilidade de rotas para atendimento de serviços



Fonte: Autor

Introduzido o problema e o desenvolvimento da solução, é necessário apresentar as simulações realizadas e os ganhos esperados. Serão desenvolvido dois modelos de otimização.

O primeiro simulará cenários de despacho para minimização da distância percorrida total. O algoritmo deverá ser capaz de executar cenários com possibilidades reais

de despacho, considerando números factíveis de equipes disponíveis para atendimento e quantidades de serviços totais que devem ser roteirizados.

Já o segundo modelo terá como objetivo minimizar o Custo Global de uma configuração inicial de atendimento: notas de serviço distribuídas aleatoriamente sobre um plano geográfico e respectivas quantidades de veículos disponíveis para atendimento, assim como o primeiro modelo, mas incluindo agora todos os atributos que caracterizam cada serviço. Estes atributos serão levantados ao longo do trabalho e serão responsáveis por caracterizar da forma mais completa possível a especificidade e criticidade de um serviço. Visto que este modelo depende da avaliação comparativa de critérios, os pesos estabelecidos para cada um serão alterados e verificada a influência no resultado nos roteiros otimizados. Assim como o anterior, este modelo deverá ser capaz de simular cenários factíveis de atendimento de uma base de equipes de campo de uma distribuidora de energia.

Por fim, cenários comuns serão utilizados em ambos modelos e verificadas as configurações finais de despacho. O objetivo é avaliar o quanto um resultado otimizado para reduzir distâncias impacta no custo global e o quanto uma configuração que visa minimizar o custo global do atendimento onera a logística de roteirização, ou seja, quanto impacta no somatório das distâncias percorridas.

### 1.3 Revisão Bibliográfica

Na literatura especializada, podem ser encontrados diferentes trabalhos que propõem a otimização de roteiros de serviços em distribuidoras de energia elétrica. No trabalho apresentado por Ñahuis (2013), o objetivo foi realizar a otimização de despacho de equipes em um cenário histórico real em uma cidade brasileira criando as possibilidades de trajeto em um modelo de grafos e inserindo uma função de custo somente para ocorrências emergenciais baseada em quantidade de clientes e um valor de DEC máximo permitido. Ñahuis (2013) inicialmente modela toda a topologia da cidade exemplo em ruas, avenidas, respectivos sentidos e pontos de atrasos entre escolas. Na função de custo, ele considera eventuais horas-extras de equipes que violem jornadas de trabalho, potenciais multas por DEC que a concessionária ficará responsável caso limites de atendimento sejam violados e atendimentos prioritários. Dentre as restrições, destaca-se a necessidade de movimentação das viaturas somente em vértices adjacentes no modelo de grafo desenvolvido pelo autor e o atendimento exclusivo de cada serviço por até no máximo uma viatura de campo. Definida a modelagem e utilizando o solver comercial CPLEX para solução do problema de otimização, o autor elabora cenários de atendimento com diferentes variáveis.

Já Fonini (2016) desenvolve um estudo do comportamento de despacho e execução de ordens, tanto emergenciais quanto comerciais, de uma distribuidora de energia. Neste trabalho, há a introdução dos atributos das notas serem atendidas, como prazo,

valor e criticidade, entretanto o problema não trata dos atributos de forma direta: eles são utilizados para alocar os serviços em grupos de prioridades, em sequência de 0 a 3, os quais influenciam a sequência de despacho. Uma abordagem importante do trabalho apresentado em Fonini (2016) é a introdução ao problema dos sistemas de filas de atendimento. Há uma avaliação do impacto na qualidade do atendimento das ordens pendentes, bem como avaliação do recurso necessário para atendê-las.

Fonini (2016) avalia ainda um caso logístico real de uma distribuidora e todo impacto logístico na programação de despacho, incluindo todos os passos na programação. Inicia com o conceito de alocação de postos de atendimento, que são regiões geográficas para restrição do deslocamento de equipes, inserção de equipes de atendimento nos postos de atendimento e avaliação da relação *demanda x recurso*, definição da matriz de prioridades dos serviços a serem atendidos e, por fim, a execução do algoritmo de roteirização com base em todos estes parâmetros.

Há estudos de otimização em setores diferentes mas com objetivos similares, como em Ferreira et al. (2017). Neste trabalho, quatro diferentes meta-heurísticas são avaliadas em termos de complexidade computacional e qualidade dos resultados: Simulated Annealing (SA), Busca Tabu (BT) e Algoritmo Híbrido (AH), para um problema de entrega e/ou entrega de mercadorias. Para avaliação, foram definidos dois cenários, o primeiro com 5 agrupamentos e 5 roteiros, o segundo com 3 agrupamentos e 3 roteiros. Para o primeiro cenário, o melhor resultado foi obtido com o algoritmo BT e para o segundo, uma combinação de BT, AH e SA.

Em Teles et al. (2010), foi desenvolvido um sistema de alocação de equipes para atendimentos emergenciais conforme a demanda histórica. Através de uma heurística chamada *Heurística Diagonal*, avalia-se o carregamento de cada metro quadrado da concessão e obtém-se a quantidade de equipes necessárias para cada poligonal. O estudo indica resultados de melhorias operacionais, como redução do tempo de espera e da quilometragem percorrida pelas equipes em campo.

Aplicação prática de um sistema de despacho de ocorrências emergenciais e seus requisitos tecnológicos pode ser encontrada em Mcmenemy et al. (2017). Este artigo descreve o processo de migração de um sistema de despacho de ocorrências centralizado para um sistema descentralizado. Para tal, foi implantado um sistema avançado de gerenciamento de ocorrências (ADMS) e foram feitas adequações no ferramental de todas as equipes de campo. Mcmenemy et al. (2017) indica que grandes desafios foram a avaliação em tempo real de disponibilidade dos profissionais de campo e a garantia de comunicação dos dispositivos móveis com os centros de operação.

Existem trabalhos em linhas similares de pesquisa que retratam estudos de resposta de alocação de equipes e resolução de problemas em situação de extrema contingência, tais como em Xu et al. (2007) e Arab et al. (2015). Em Xu et al. (2007), foi desenvolvido um método de otimização para um modelo simulado de terremotos em uma

concessionária de energia dos Estados Unidos. O objetivo do trabalho foi obter, a partir de 47 cenários diferentes de terremotos como parâmetros de entrada, sequências otimizadas de programação e restauração da rede elétrica pós contingências. O modelo obteve evoluções significativas em indicadores de continuidade (redução de aproximadamente 1,2% de DEC, por exemplo). Em Arab et al. (2015), ainda que não houvesse abordagem de alocação de equipes ou roteirização, ainda se trata de um problema estocástico relevante para o presente trabalho. O artigo trata da utilização de heurística para alocação dos principais recursos energéticos (óleo diesel, baterias e ônibus elétricos) ao longo de uma cidade para prover energia elétrica em momentos que precedem furacões.

Em relação à utilização de metodologias de processo decisório, estão presentes na literatura trabalhos de utilização dos métodos para resolução de problemas diversos que necessitem de avaliação comparativa. Relacionado a problemas do setor elétrico, é possível citar Janjic et al. (2012). Neste artigo, é utilizado o método *Analytic hierarchy process* (AHP) para definir o despacho ótimo de geração distribuída para selecionar a melhor fonte de despacho. Os principais objetivos são minimizar o custo total de operação, maximizar a utilização de fontes renováveis e ainda satisfazer restrições relacionadas à operação do sistema. Foram definidos quatro diferentes aspectos, que variam desde aspectos econômicos (quantificáveis como custo total de operação e manutenção) a aspectos ambientais (subjetivos como poluição ambiental e visual). Estes aspectos englobam, ao todo, oito diferentes critérios e que são utilizados classificar cinco diferentes alternativas: usinas solares, parques eólicos, pequenas usinas hidrelétricas, usinas a biomassa e usinas a energia geotérmica. O trabalho utiliza a comparação entre pares em dois níveis, inicialmente de cada aspecto e na sequência de cada critério.

Conforme explanado, os trabalhos acadêmicos relacionados ao tema se dividem em dois grupos principais: um grupo voltado para otimização de funções objetivos bem definidas (minimização de custos financeiros, minimização de distâncias, entre outros) e outro grupo que utiliza métodos decisórios para avaliar alternativas e compará-las. Mas não há registros significativos de problemas que abordem os dois temas: como criar uma função objetivo multicritério que descreva um problema multifacetário como o despacho de uma distribuidora de energia e buscar uma solução factível para roteirização. Este nicho de pesquisa é o que este trabalho se aproxima e busca compreender.



## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Programação linear inteira

A evolução tecnológica provocada pelos últimos anos prepara terrenos para a criação de soluções computacionais cada vez mais complexas que consigam envolver muitas variáveis e restrições para grandes problemas de otimização. Estes métodos de solução de problemas podem ser utilizados para tratativas de problemas de planejamento, produção, coordenação, investimento, transporte, entre outros, e são e aplicáveis às mais diferentes áreas, não somente às áreas precursoras da utilização destes métodos, como Ciência da Computação e Pesquisa Operacional (Goldbarg et al., 2017).

O termo programação inteira refere-se a problemas nos quais as variáveis de decisão e estado são números inteiros, em que muitos casos assumem somente valores binários, e trata-se de uma classe de problemas de otimização restrita. Problemas de otimização com variáveis inteiras e contínuas são denominados problemas de Programação Linear Inteira Mista (PLIM).

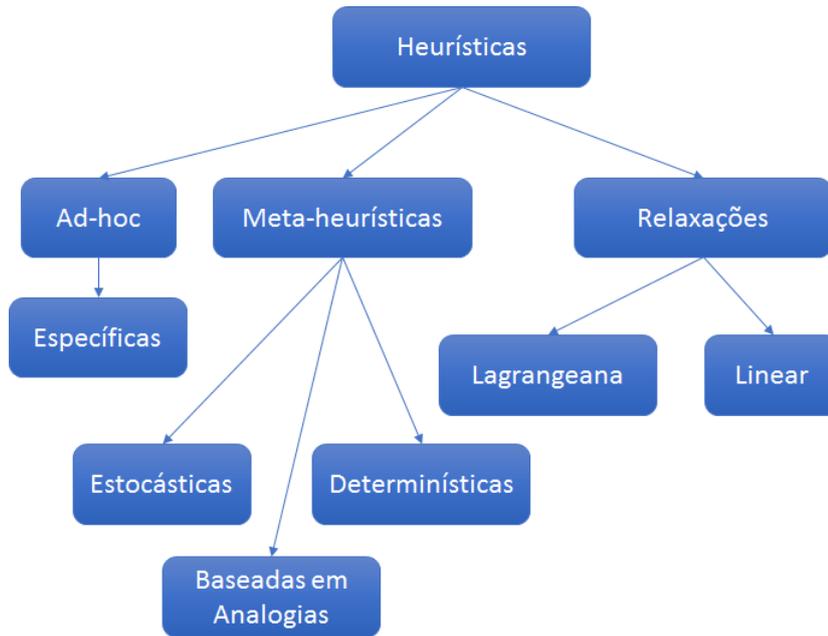
Uma estratégia comum para avaliações exatas de problemas de PLIM são os algoritmos do tipo *Branch-and-bound* (B&B). Originalmente concebidos para problemas tipo PLI, métodos *branch-and-bound* baseiam-se numa ideia de enumerar de forma direcionada os principais candidatos à solução ótima inteira de um problema. Dentre as principais estratégias de aplicação estão as técnicas de formação da árvore, como Dakin (1965) e Land e Doig (2010).

Ainda que algoritmos de soluções exatas sejam eficientes para problemas lineares contínuos, não há o mesmo desempenho para problemas discretos. A aplicação de um método exato para um problema combinatório de  $n$  variáveis gera  $2^{\frac{n+1}{2}}$  diferentes soluções.

Com o objetivo de reduzir esforço computacional para solução de problemas deste tipo, foram desenvolvidas técnicas que alcancem sempre soluções viáveis para um determinado problema de otimização. Estes métodos são denominados heurísticas (Goldbarg et al., 2017). A figura 2.1 indica as principais abordagens heurísticas presentes na literatura.

#### 2.1.1 Heurísticas de busca local

Heurísticas construtivas são comumente utilizadas para resolver problemas com soluções que podem ser direcionadas. Por exemplo, em problemas derivados do Problema do Caixeiro Viajante (*Travelling Salesman Problem* - TSP), sabe-se que soluções de menor valor, ou locais, estão associadas à montagem da rota ligando os vértices mais próximos. Sendo assim, é possível o desenvolvimento de heurísticas construtivas que direcionem as buscas a partir de uma lógica coerente com o problema. Soluções deste tipo, apesar de não serem aplicáveis a problemas complexos, são de ótimo custo computacional e

**Figura 2.1.** Classificação de abordagens de métodos heurísticos

Fonte: Goldberg et al. (2017)

trazem resultados aderentes a problemas que podem ser direcionados, como problemas de roteamento de veículos.

Dentre as heurísticas construtivas, serão detalhadas as heurísticas de busca do Vizinho mais Próximo (*Nearest Neighbour Algorithm* - NNA) e a heurística de Gillet & Miller, que serão utilizadas de forma conjunta neste trabalho. Uma das mais antigas e de simples implementação, o processo de NNA é iniciado a partir da seleção de um vértice do problema e, de forma iterativa, são inseridos os vértices seguintes que sejam mais próximos do anterior, desde que não tenham sido selecionados anteriormente (Gutin et al., 2002). O algoritmo abaixo resume o método de NNA:

---

**Algorithm 1** Pseudocódigo do algoritmo de Busca do Vizinho mais Próximo - NNA

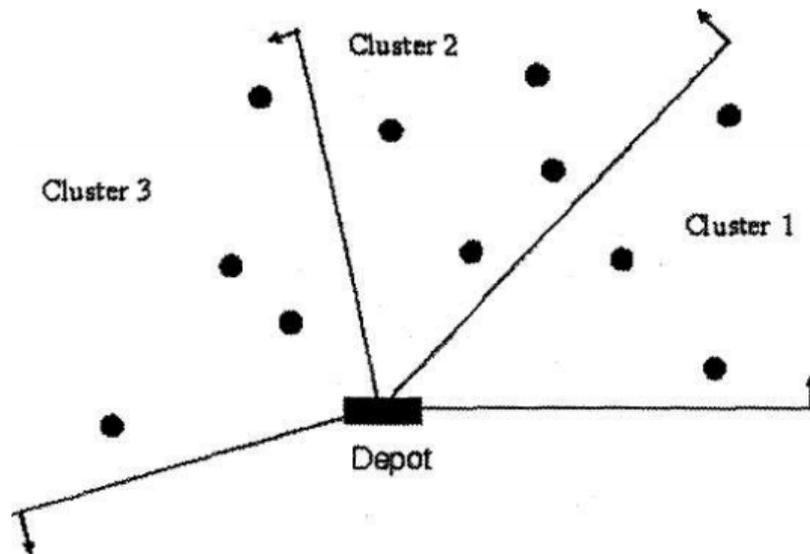
---

- 1: Encontra o nó pioneiro 1
  - 2: **for** nó  $i = 1$  até todos os nós  $n$  **do**
  - 3:   Encontra o nó  $k$  mais próximo do nó  $i$
  - 4:   Avalia se o nó  $k$  não foi utilizado
  - 5:   Assume próximo valor de nó  $\leftarrow k$
  - 6:   Armazena nós utilizados
  - 7: **end for**
- 

A heurística de Gillet e Miller (1974) trata do agrupamento dos vértices do problema de TSP em grupos seguindo critério de proximidade. Em seguida, a proposta é que cada grupo (ou *cluster*) seja solucionado de forma independente. Este método é muito utilizado para problemas com múltiplos veículos para atendimento, já que reduz bastante

a complexidade computacional. A figura a seguir indica um exemplo de agrupamento a partir do método.

**Figura 2.2.** Exemplo do processo de clusterização



Fonte: Nurcahyo et al. (2002)

A heurística de Gillet e Miller faz parte de uma classe de heurísticas divididas em duas fases: primeiro agrupar depois rotear. O processo de agrupamento pode ser resumido no algoritmo a seguir. Os nós são agrupados por suas devidas coordenadas polares, ordenados e atribuídos a respectivos *clusters* (desde que todas as restrições dos problemas seja satisfeitas).

---

**Algorithm 2** Pseudocódigo do Algoritmo de Gillet e Miller

---

- 1: Obtém coordenadas polares de todos os nós em relação ao ponto de partida
  - 2: Ordena todos os nós em relação a seus ângulos polares
  - 3: **for** nó  $i = 1$  até todos os nós  $n$  **do**
  - 4:     **if** Avalia condição de saturação da rota  $r$  **then**
  - 5:         Avalia restrições do problema
  - 6:         Atribui nó  $i$  à rota  $r$
  - 7:     **else**
  - 8:         Atualiza rota  $r$  para  $r + 1$
  - 9:         Avalia restrições do problema
  - 10:         Atribui nó  $i$  à nova rota  $r$
  - 11:     **end if**
  - 12: **end for**
-

## 2.2 Meta-heurísticas e Busca Tabu

Dentro dos métodos heurísticos, existe uma linha de algoritmos computacionais denominados meta-heurísticas (ou heurísticas modernas). O termo é definido por Osman e Laporte (1996) como *Um processo iterativo que guia heurísticas subordinadas, combinando diferentes e inteligentes conceitos para explorar e explorar o espaço de busca.*

Avaliando e classificando as heurísticas em relação à estratégia de estrutura de vizinhanças, é possível separar os métodos em quatro grupos diferentes (Goldberg et al., 2017):

- **Métodos com estrutura de vizinhança fixa:** Algoritmos em que a estrutura de vizinhança é definida desde o início do processo, de forma inflexível. Exemplos são os métodos GRASP e *Simulated Annealing*;
- **Métodos com estrutura de vizinhança flexível:** São métodos de busca que têm vizinhanças não definidas ou que se adequam de forma sistemática ou até aleatória. Exemplos deste modelo são os métodos Busca Tabu e algoritmos evolucionários em geral;
- **Métodos com estrutura de vizinhança variável:** Conceitualmente, são métodos que abrangem possibilidades de exploração do espaço de busca com várias estruturas de vizinhança diferentes, como o método Busca em Vizinhança Variável

### 2.2.1 Método Busca Tabu

Diferentemente de alguns métodos meta-heurísticos, a Busca Tabu não está associada a qualquer processo ligado à natureza. Conceitos construtivos relacionados ao método foram introduzidos originalmente por Glover (1986) e admitem abordagens tanto determinísticas, como em Ongsakul et al. (2004), quanto probabilísticas, como em Gendreau et al. (1993).

De modo resumido, a Busca Tabu insere um modelo de memória que reduz a possibilidade de que soluções de má qualidade sejam geradas sucessivamente. Para isto, é criada uma lista de proibições dinâmica, denominada lista Tabu, que altera os dados proibidos de modo que se baseie em memórias de curto prazo e que a busca não fique limitada a um mínimo local fixo. Ou seja, além de impedir que configurações utilizadas sejam repetidas como possíveis soluções, a memória de curto prazo impede que o algoritmo se estabilize em um mínimo local

A seguir, está resumido um algoritmo simplificado de Busca Tabu, com indicação dos principais movimentos e como é formada a lista de proibições (Goldberg et al., 2017). De modo resumido, o algoritmo inicia com a construção de uma solução pioneira para o problema. A partir disto, são realizadas formações de novas soluções e os movimentos

realizados a cada iteração são classificados em relação à sua qualidade e podem passar a compor a lista Tabu. No exemplo, os movimentos incluídos na lista Tabu são aqueles que produzem soluções piores que as obtidas anteriormente. Realizam-se iterações até os critérios de paradas serem satisfeitos.

---

**Algorithm 3** Pseudocódigo do Algoritmo Busca Tabu

---

```

1: Gera uma solução inicial  $s$  e fazer  $s^* := s$ 
2: Inicializa a Lista Tabu ( $T$ ) e contadores  $p$  e  $q$ 
3: while  $p \neq p_{max}$  do
4:   Selecionar o melhor vizinho  $s' \in N(s) \setminus T$ 
5:   Selecionar o melhor vizinho  $s'' \in N(s) \cap T$ 
6:   if  $f(s'') < f(s')$  e  $f(s'') < f(s^*)$  then
7:      $s' \leftarrow s''$ 
8:   end if
9:   if  $f(s') < f(s^*)$  then
10:     $s^* \leftarrow s'$ 
11:     $q \leftarrow 0$ 
12:   end if
13:   if  $f(s') < f(s)$  then
14:     Movimento inverso ( $s', s$ ) na lista  $T$  e atualizar  $T$ 
15:   end if
16:    $s \leftarrow s'$ 
17:    $p \leftarrow p + 1$ 
18:    $q \leftarrow q + 1$ 
19: end while

```

---

A Lista Tabu é a estrutura de memória mais importante neste algoritmo. São possíveis diversas arquiteturas diferentes para organização da lista. Dentre os atributos para definição e controle do conteúdo da lista, é possível alterar o tamanho da lista (fixo, aleatório ou definido através de intervalos pré-estabelecidos) e sua estrutura de memória.

Em relação às estruturas de memória, existem três diferentes tipos de memória principais. Estas estruturas são definidas conforme a necessidade de armazenamento de soluções proibidas em função das iterações. Dentre as possibilidades, estão:

- **Memórias de curto prazo:** Estrutura de memória mais comum em algoritmos Tabu. Tratam-se de estruturas com possibilidade de liberação de memória a partir de algumas iterações. Nesta estrutura, toda solução proibida pode ser liberada para ser avaliada em uma situação futura. Além disto, não há nenhuma possibilidade de armazenamento paralelo dos atributos uma vez pertencentes à lista;
- **Memórias de médio prazo:** Esta estrutura agrega mais uma alternativa de memória paralela. São possibilidades de armazenamento:
  - Soluções de elite;
  - Soluções interessantes não exploradas;

- Áreas exploradas para informar operações de reinício;
  - Regras heurísticas para formação de soluções alternativas.
- **Memórias de longo prazo:** Memórias de longo prazo são utilizadas na diversificação do espaço de busca. Estes algoritmos são mais incomuns. Dentre as estratégias mais usuais, destaca-se a Estatística de Movimentos, que consiste em controlar os movimentos a partir de uma estratégia de longo prazo de forma a complementar a estrutura tabu (Reeves, 1993). Um exemplo se trata de um direcionamento dos movimentos a partir de um valor médio de melhoria de longo prazo.

### 2.3 Métodos de Análise de decisão multicritério

*Multi-criteria decision analysis*, ou métodos de análise de decisão multicritério (MCDA), foram desenvolvidos para apoiar o processo decisório para encontrar uma solução de compromisso utilizando métricas e processos definidos e claros. Existe o compromisso com a solução final porque os métodos colocam o decisor no centro do processo e convergem tanto atributos objetivos quanto subjetivos.

MCDA é um método que engloba matemática, gestão, informática, psicologia, ciências sociais e economia. Sua aplicação é ainda mais ampla, pois pode ser usado para resolver qualquer problema em que uma decisão significativa precisa ser tomada (Ishizaka e Nemery, 2013). De acordo com Roy (1981), existem quatro tipos principais de decisões que pessoas enfrentam diariamente:

- Problema de escolha: O objetivo é selecionar a melhor opção individual ou reduzir o grupo de opções para um subconjunto de opções boas equivalentes;
- Problema de classificação: As opções são classificadas em grupos ordenados e predefinidos, chamadas categorias. O objetivo é então reagrupar as opções com comportamentos semelhantes ou características por motivos descritivos, organizacionais ou preditivos. Os métodos de classificação são úteis para processos repetitivos ou automáticos, mas também podem ser usados como uma triagem inicial para reduzir o número de opções a serem consideradas em uma etapa subsequente;
- Problema de ordenação: As opções são ordenadas da melhor para a pior por meio de pontuações ou comparações entre pares;
- Problema descritivo: O objetivo é descrever as opções e suas consequências relacionadas. Este movimento geralmente é feito na primeira etapa para entender as características de um determinado processo decisório.

Dentre os principais métodos mais populares utilizados em processos decisórios multicritérios, pode-se citar os indicados na tabela 2.1. Cada um dos métodos é mais in-

dicado para um determinado objetivo de decisão, tratando-se ele um problema de escolha, ordenação, classificação, ou descritivo.

**Tabela 2.1.** Métodos decisórios e aplicações

Problemas de Escolha	Problemas de Ordenação	Problemas de Classificação	Problemas Descritivos
AHP ANP MAUT/UTA MACBETH PROMETHEE ELECTRE I TOPSIS Goal Programming DEA	AHP ANP MAUT/UTA MACBETH PROMETHEE ELECTRE III TOPSIS DEA	AHPSort  UTADIS  FlowSort ELECTRE-Tri	GAIA, FS-Gaia

Fonte: Ishizaka e Nemery (2013)

A Tabela ?? indica os principais métodos utilizados em processos decisórios para escolha, ordenação, classificação e problemas descritivos. Serão abordados a seguir dois métodos, mais comumente utilizados, que atendem critérios satisfatórios como métodos de escolha e ordenação. São eles os métodos AHP e PROMETHEE II.

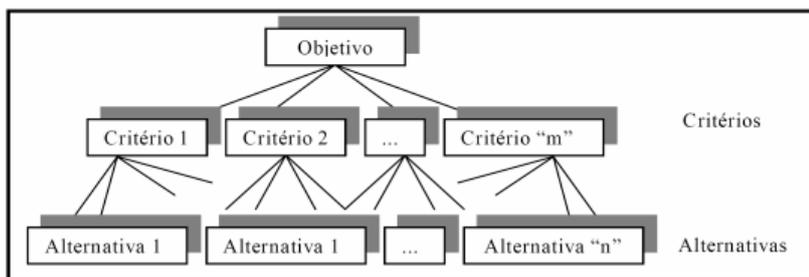
### 2.3.1 Analytic Hierarchy Process (AHP)

O método AHP foi desenvolvido por Tomas L. Saaty no início da década de 70 e é o método decisório mais conhecido e utilizado no apoio à tomada de decisão em problemas com múltiplos critérios. É baseado em um método que busca resumir um problema complexo de comparação a partir da segmentação e divisão em níveis mais baixos, estabelecendo relações, para, na sequência, serem consolidados (Marins et al., 2009). A figura 2.3 representa a árvore de hierarquia do método.

Este método é composto por quatro etapas de avaliação, que serão detalhadas subsequentemente:

- Estruturação do problema;
- Comparação entre pares de critérios;
- Verificação de consistência;
- Análise de sensibilidade.

Apesar dos dois últimos itens não serem obrigatórios na metodologia, são recomendados para avaliação de consistência e robustez das escolhas realizadas.

**Figura 2.3.** Modelo simplificado de hierarquia de critérios

Fonte: Marins et al. (2009)

### 2.3.1.1 Etapa de estruturação do problema

Esta etapa define a estruturação global do problema, o que significa elencar e ter a clareza de todos os critérios envolvidos na análise comparativa. Isto implica em avaliar os critérios em relação a extensão, impacto, graus de subjetividade e extensão de possíveis valores, em casos de critérios objetivos e mensuráveis, ou extensão de classificação em casos de critérios subjetivos de avaliação.

Para ilustrar, um problema possível para utilização do método AHP é a avaliação de compra de modelos de *smartphones*. Dentre os critérios, estão beleza, exemplo de critério subjetivo, e preço, exemplo de critério objetivo e mensurável.

### 2.3.1.2 Etapa de comparação entre pares de critérios

Esta etapa trata do estabelecimento de prioridades entre critérios. Os critérios são comparados entre pares e os resultados são alocados em escalas de 1 a 9, conforme a tabela orientativa 2.2.

**Tabela 2.2.** Escala fundamental de Saaty 1-9

Grau de Importância	Definição
1	Igual importância
3	Importância pequena de uma sobre a outra
5	Importância grande
7	Importância muito grande
9	Importância absoluta
2,4,6,8	Valores intermediários entre os apresentados

Fonte: Saaty (1991)

Este processo requer o comparativo entre pares de todos os critérios, o que requer grande esforço comparativo para qualquer incremento de critérios. A seguir está indicado a quantidade de comparações necessárias para  $n$  critérios (Saaty, 1991).

$$\frac{n^2 - n}{2} \quad (2.1)$$

### 2.3.1.3 Cálculo do autovetor e autovalor da matriz de comparações

Nesta avaliação, o autovetor da matriz dá a ordem de prioridade e o autovalor a medida de consistência do julgamento, utilizado para o Índice de Consistência. Para utilização final dos pesos, existem dois meios de sintetizar as prioridades das alternativas, segundo Saaty (1994): o modo distributivo e o ideal. No distributivo, a soma de todos os pesos (extraídos do autovetor da matriz de comparações) é igual a 1.

### 2.3.1.4 Etapa de verificação de consistência

Finalizada a matriz de comparação, é necessário avaliar a consistência da definição dos parâmetros. Como a etapa anterior é realizada em pares, é possível a ocorrência de problemas de consistência. A sequência de inferências a seguir ilustra um exemplo de comparativos inconsistentes.

- Critério 1 é mais relevante que critério 2
- Critério 2 é mais relevante que critério 3
- Critério 3 é mais relevante que critério 1

Para avaliação do nível de consistência da matriz de comparação definida, são calculados dois índices: índice de consistência (IC) e razão de consistência (RC). O índice de consistência é calculado a partir do autovalor ( $\lambda_{max}$ ), e define IC como:

$$IC = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (2.2)$$

Já RC é calculado como o valor de IC para índices aleatórios definidos por Saaty (1991), conforme a dimensão da matriz de atributos  $n$ . Índices para até 10 critérios estão indicados na tabela 2.3.

**Tabela 2.3.** Índices aleatórios por dimensão

n	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,58	0,90	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Fonte: Saaty (1991)

### 2.3.1.5 Etapa de análise de sensibilidade

A última etapa do desenho do processo decisório via método AHP é a análise de sensibilidade, na qual os *inputs* são ligeiramente modificados para que se possa observar

o impacto nos resultados. Esta etapa foi definida como uma validação extra, visto que cenários subjetivos podem naturalmente não ser bem modelados. Os diferentes cenários gerados podem resultar em diferentes classificações e em mudanças iniciais de classificação.

### 2.3.2 Método PROMETHEE II

O acrônimo PROMETHEE representa, do inglês, *Preference Ranking Organization Method for Enriched Evaluation* (Brans e Vincke, 1985). É um dos métodos que se adapta muito bem a problemas de classificação e ordenação, indicado para resolução de problemas multicritérios do tipo:

$$\text{Max} \{f_1(a), f_2(a), \dots, f_k(a) | a \in A\} \quad (2.3)$$

Onde:

$A$  = conjunto de alternativas finitas;

$f_j(n)$  = representa as  $n \times k$  avaliações de critérios sobre  $A$

Ele provê ao decisor um ranking de escolhas baseadas em escalas de classificação e pode ser resumido em três etapas:

- Sequência comparativa de critérios em pares;
- Cálculo de fluxos unilaterais;
- Cálculo de fluxos globais.

O método PROMETHEE permite a atribuição de uma função de preferência, que assume padrões binários ou analógicos e tentam retratar ao máximo a dominância de um critério em relação a outro. Neste método, os critérios também são avaliados em pares e existe a possibilidade que eles interajam entre si de formas diferentes.

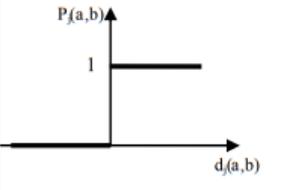
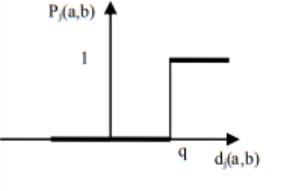
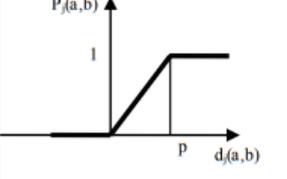
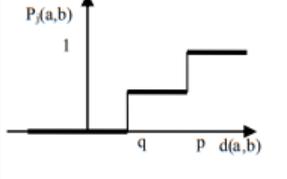
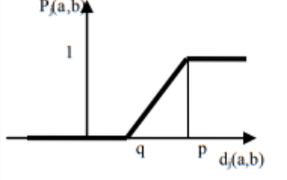
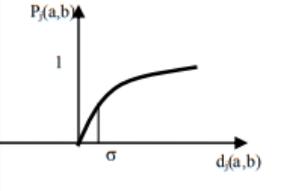
A figura a seguir indica os seis tipos de função de preferência possíveis para representação das comparações.

A partir das funções de preferência, é possível a construção dos índices de preferência ponderada, responsável por indicar o percentual de preferência da alternativa  $a$  em relação a  $b$ , considerando os pesos de cada critério. O índice de preferência ponderada,  $\pi$ , pode ser definido conforme equação 2.4 (Moreira, 2009).

$$\pi(a, b) = \frac{\sum_{j=1}^k w_j P_j(a, b)}{\sum_{j=1}^k w_j} \quad (2.4)$$

Onde:

Figura 2.4. Seis tipos de funções de preferência

Tipo de Critério	Representação	Parâmetros	
(I) Critério Usual		$P_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d_j(a,b) > 0 \\ 1 & \text{se } d_j(a,b) \leq 0 \end{cases}$	-
(II) Quase-Critério		$P_j(a,b) = \begin{cases} 0 & \text{se } d_j(a,b) > q \\ 1 & \text{se } d_j(a,b) \leq q \end{cases}$	q
(III) Critério de preferência linear		$P_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{se } d_j(a,b) > p \\ d_j(a,b)/p & \text{se } 0 < d_j(a,b) \leq p \\ 0 & \text{se } d_j(a,b) \leq 0 \end{cases}$	p
(IV) Critério de nível		$P_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{se } d_j(a,b) > p \\ 1/2 & \text{se } q < d_j(a,b) \leq p \\ 0 & \text{se } d_j(a,b) \leq q \end{cases}$	q, p
(V) Critério de preferência linear com zona de indiferença		$P_j(a,b) = \begin{cases} 1 & \text{se } d_j(a,b) > p \\ [d_j(a,b) - q] / (p - q) & \text{se } q < d_j(a,b) \leq p \\ 0 & \text{se } d_j(a,b) \leq q \end{cases}$	q, p
(VI) Critério gaussiano		$P_j(a,b) = \{1 - \exp[-[d_j(a,b)]^2 / 2\sigma^2]\}$	σ

Fonte: Moreira (2009)

- $\pi$  = índice de preferência ponderada;  
 $j$  = critério de avaliação;  
a e b = alternativas comparadas;  
 $w_j$  = pesos definidos para cada critério;  
 $P$  = função de preferência.

A função indica o percentual de preferência da alternativa  $a$  frente a alternativa  $b$  a partir de pesos definidos para cada critério. Existem vários tipos de função de preferência,

dependendo da relação entre os critérios, podendo ser de total dominância, dominância linear, dominância gaussiana, entre outras. A relação detalhada está indicada na figura 2.4.

Os pesos devem ser determinados previamente porque fazem parte do processo de priorização e classificação de critérios. Comumente, o processo de atribuição de pesos pode ser realizado utilizando um método complementar em processos decisórios, mais especificamente os direcionados a problemas de escolha ou seleção, como o método AHP.

Nestes problemas complementares, por exemplo, é primeiro executado o método AHP para definição dos pesos de cada critério definido e, subsequentemente, utilizado o método PROMETHEE para classificação e ordenação de alternativas que utilizem tais critérios.

### 2.3.2.1 Cálculo de fluxos unilaterais

Não é trivial tomar decisões baseadas nas matrizes de comparação, especialmente quando o número de comparações é elevado. Sendo assim, a comparação de critérios em pares é sumariada nas avaliações de fluxo, positivos, negativos e o fluxo líquido. Estas medições determinam o quanto cada alternativa é preferencial em relação a todas as demais.

O fluxo de entrada, representado por  $\phi^+$ , indica a intensidade da preferência da alternativa  $a$  sobre todas as demais. Já o fluxo de saída ( $\phi^-$ ), representa a intensidade de todas as demais alternativas sobre  $a$ . Percebe-se que, enquanto o fluxo de saída mede a sobre-classificação de uma alternativa sobre as demais, o fluxo de entrada mede a sub-classificação dela sobre as demais. O fluxo líquido, portanto, é o resultado da diferença entre o fluxo de saída e o fluxo de entrada de uma mesma alternativa e quanto maior for o fluxo líquido, melhor é a alternativa.

### 2.3.2.2 Cálculo de fluxos globais e funções de preferência

O método se divide em duas diferentes possíveis avaliações do resultado do fluxo global. Para uma relação comparativa entre pares, é utilizado o método PROMETHEE I, o qual resulta em, comparando critérios  $a$  e  $b$ , define-se se existe uma relação de superação, indiferença ou incomparação (Brans et al., 1986). A relação de fluxos entre alternativas resulta nas conclusões prévias indicadas nas equações 2.5 e 2.6.

$$\begin{cases} aP^+b & \text{se } \phi^+(a) > \phi^+b \\ aI^+b & \text{se } \phi^+(a) = \phi^+b \end{cases} \quad (2.5)$$

$$\begin{cases} aP^-b & \text{se } \phi^-(a) < \phi^-b \\ aI^-b & \text{se } \phi^-(a) = \phi^-b \end{cases} \quad (2.6)$$

É possível então inferir sobre o resultado parcial PROMETHEE I ( $P_I, I_I, R$ ) considerando o resultado das relações anteriores e sintetizando-as como na equação 2.7:

$$\left\{ \begin{array}{ll} aP_I b \text{ (} a \text{ supera } b\text{)} & \text{se } aP^+b \text{ e } aP^-b, \\ & \text{ou } aP^+b \text{ e } aI^-b, \\ & \text{ou } aI^+b \text{ e } aP^-b; \\ aI_I b \text{ (} a \text{ é indiferente a } b\text{)} & \text{se } aI^+b \text{ e } aI^-b; \\ aRb \text{ (} a \text{ e } b \text{ são incomparáveis)} & \text{para todos as demais situações.} \end{array} \right. \quad (2.7)$$

Em casos em que é necessária uma ordenação completa de todas as alternativas, utiliza-se a variação PROMETHEE II do método ( $P_{II}, I_{II}$ ) a partir dos fluxos globais de cada alternativa (Brans et al., 1986):

$$\left\{ \begin{array}{ll} aP_{II} b \text{ (} a \text{ supera } b\text{)} & \text{se } \phi(a) > \phi(b), \\ aI_{II} b \text{ (} a \text{ é indiferente a } b\text{)} & \text{se } \phi(a) = \phi(b). \end{array} \right. \quad (2.8)$$

De acordo com Brans et al. (1986), embora seja mais fácil para o tomador de decisão solucionar o problema usando a ordenação completa, a avaliação parcial contém informações mais realistas. Estas informações, especialmente no que diz respeito às incomparabilidades, podem ser muito úteis no processos de escolha.

### 2.3.3 Utilizações combinadas de métodos decisórios

Na literatura, são comuns abordagens combinadas de métodos decisórios. Isto acontece com o objetivo de aproveitar pontos fortes de cada método. Quando é necessária uma avaliação de escolha seguida por uma necessidade de ordenação, podem ser combinados dois ou mais métodos mais indicados para cada um das etapas.

Dentre os mais comuns em relação à complementariedade, pode-se citar os métodos descritos anteriormente: utiliza-se o método AHP para seleção e avaliação de critérios seguido do método PROMETHEE I ou II para ordenação.

Neste trabalho, os dois métodos serão utilizados para classificar e ordenar cada uma das notas de serviço. EM um primeiro momento, será utilizado o método AHP para classificação dos critérios (ou atributos) utilizados para categorizar para um dos serviços. O resultado será a matriz normalizada ordenada indicando a criticidade de cada um. Na sequência, utilizando estas informações como dados de entrada, será utilizado o método PROMETHEE II para ordenação de cada uma das notas de serviços a partir dos valores atribuídos para cada um dos critérios.



### 3 METODOLOGIA

O presente trabalho fará a avaliação das oportunidades do despacho de serviço otimizado em situações factíveis se aproximando ao máximo da realidade. Serão simulados cenários de roteirização com diferentes quantidades de serviços a serem executados, entre 15 e 50, e variando veículos disponíveis para atendimento. Somado a isto, serão simulados diferentes atributos para cada serviço: enquanto um pode se tratar de um atendimento comercial de uma nota de serviço com vencimento próximo, outro pode ser um desligamento de muitos clientes rurais e um terceiro um reclamação de falta de energia de um cliente crítico, como um hospital ou uma grande indústria.

Serão comparados os resultados de dois modelos desenvolvidos: um com o objetivo de minimização do somatório das distâncias percorridas pelos veículos e outro a minimização do custo global de atendimento.

Para o primeiro modelo, serão utilizadas heurísticas combinadas de Gillet e Miller (1974) e de busca do vizinho mais próximo (NNA). Neste modelo, não são utilizados atributos que caracterizam a prioridade dos serviços, a não ser suas localizações geográficas. Entretanto, para a segunda modelagem os pesos de cada nota de serviço serão definidos a partir de uma avaliação utilizando métodos decisórios para cada um dos atributos. Estes pesos serão incorporados à função objetivo para minimização do custo global de atendimento. Para o modelo de minimização combinatória, será utilizada o método meta-heurístico Busca Tabu.

Ao final, resultados de simulação para os mesmos cenários de despacho dos dois modelos (minimização de distância e minimização do custo global) serão avaliados e comparados.

#### 3.1 Codificação do problema

##### 3.1.1 Representação Espacial

Para início da modelagem computacional do problema, estabelece-se um ambiente de simulação que realmente represente o desafio diário de roteirização e priorização de atendimentos. Basicamente, os serviços necessários para atendimento diário são representados por pontos geográficos com coordenadas geográficas (atributos necessários para despacho e sequenciamento de execução). Além disto, geograficamente é necessário dispor a posição da Estação Avançada (EA) na qual as equipes e eletricitas estão alocados. É desta estação avançada que os eletricitas partem e retornam diariamente após um dia de serviço. É importante frisar que na prática existe uma barreira geográfica de atuação das equipes de cada EA. Na prática, a equipe de uma determinada região tem uma limitação de deslocamento para não atuar em áreas de outra gestão a não ser em casos especiais como em contingências ou grandes desligamentos. É por este motivo que

decidiu-se simular o despacho de uma EA isoladamente.

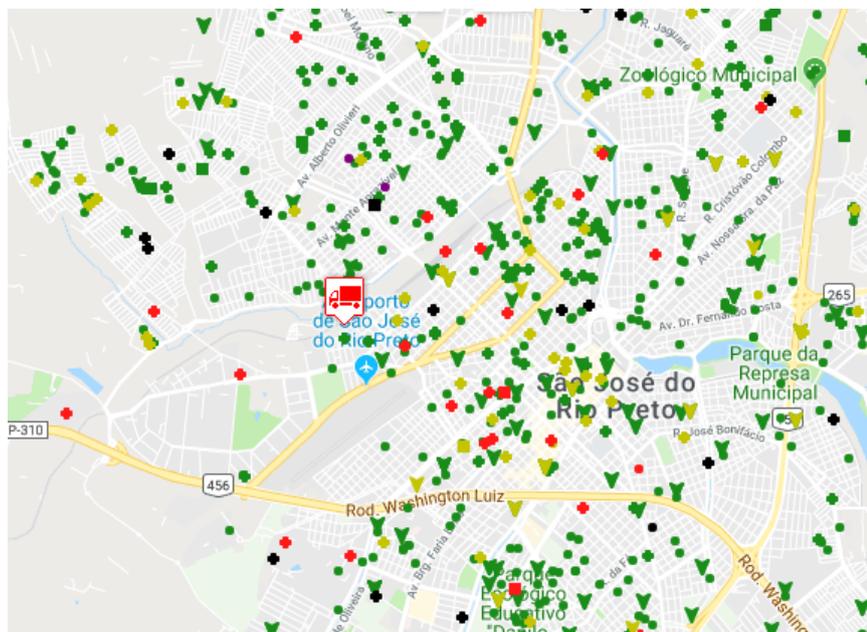
Na figura 3.1, estão representados por ícones (cuja forma geográfica representa um tipo diferente de serviço) todos os serviços comerciais passíveis de execução. Existe ainda um ícone com um veículo, que representa a localização de uma EA, no caso a localização real da EA do município de São José do Rio Preto.

Dado o volume de equipes do município indicado, não é possível realizar todos os serviços listados no mapa em apenas um dia. Muitos destes serviços (aqueles que tem prazos de vencimentos mais extensos) serão postergados para o dia seguinte ou serão cancelados (exemplo de notas de serviço de corte de energia por falta de pagamento).

Como forma de modelagem geográfica do problema de otimização, foi utilizado um plano cartesiano como plano geográfico de atendimento e o ponto (0,0) como localização da EA de simulação. Foi utilizado o ponto (0,0) para simplificação das simulações computacionais e cálculos de distâncias, mas esta posição poderia ser alterada para deslocar o ponto em relação à posição das notas de serviço. Entretanto, esta alteração somente traria uma dificuldade maior para realização das simulações e uma alteração deste tipo não convergiria com os objetivos do trabalho.

Os eixos variam entre  $[-200\ 200]$  e as notas de serviço são plotadas de forma aleatória (através de uma distribuição uniforme) para indicar cenários simulados de atendimento. A figura 3.2 exemplifica a plotagem de 15 notas de serviço em plano cartesiano para simulação.

**Figura 3.1.** Localização real de EA e notas de serviço

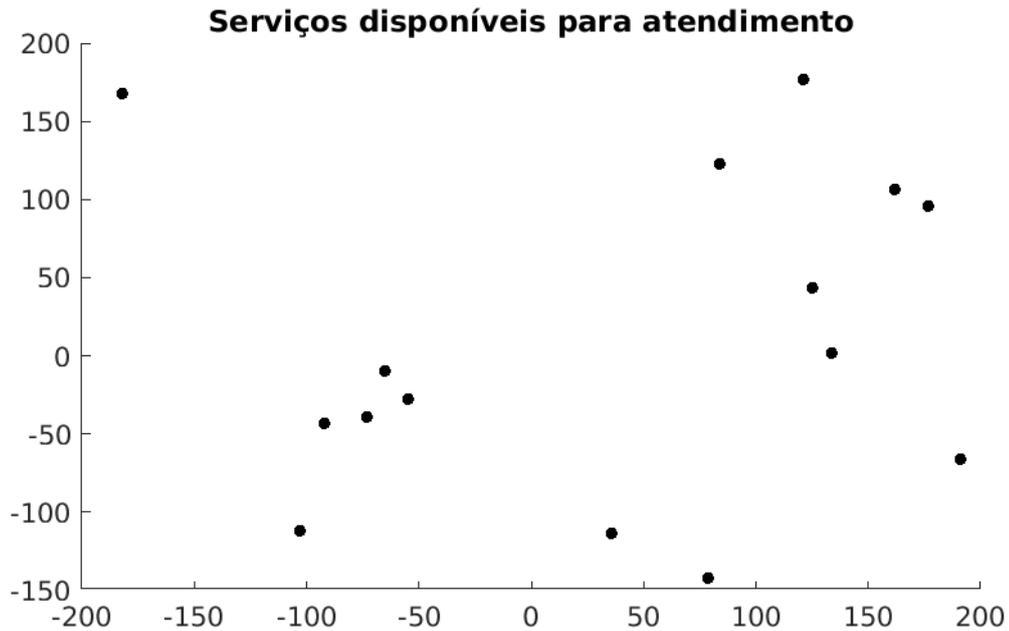


Fonte: Autor

Outro elemento de entrada importante para o sistema é a indicação da quantidade de veículos disponíveis para atendimento. A variação deste parâmetro altera significati-

vamente o problema logístico: enquanto para um cenário de 100 notas possíveis para atendimento com 10 veículos tem-se 10 serviços em média por equipe, em um cenário com 5 veículos, a relação serviço/equipe é duplicado. Entretanto, não é objetivo deste trabalho avaliar uma disposição logística ótima de atendimento, relacionando quantas equipes são necessárias para uma determinada região de abrangência. Sendo assim, a variável será utilizada para compor uma situação próxima da realidade de atendimento, oscilando simulações entre 10 a 20 notas de serviço por equipe.

**Figura 3.2.** Exemplo de plotagem de 15 notas em eixo cartesiano



Fonte: Autor

Para modelar o problema de otimização, foi definido o ambiente de simulação de atendimento: foi utilizado um plano cartesiano como plano geográfico de atendimento e o ponto (0,0) como localização da estação avançada de simulação, local do qual as equipes partem para os atendimentos diários. A figura 3.2 indica um exemplo de 15 notas disponíveis para serem atendidas.

### 3.1.2 Modelagem de variáveis

Para a modelagem dos serviços, foi definida uma Matriz Distância, que define a distância entre cada um dos serviços a serem executados. Foi definida uma função para cálculo de distância entre todas as notas de serviço, considerando uma distância em linha reta entre elas e equação 3.1 indica a Matriz Distância em questão. Certamente o melhor roteiro não será o obtido por uma otimização de rota em linha reta, visto que ruas e estradas tem sinuosidades e sentidos diversos, mas utilizou-se desta premissa

para simplificar o algoritmo. De qualquer forma, a evolução do modelo utilizado para um modelo de grafos considerando interconexão entre vias é pertinente para trabalhos futuros.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

### 3.1.3 Restrições e considerações

O objetivo da resolução do problema não inclui avaliações de capacidade de execução porque o objetivo é avaliar toda a cadeia de execução da totalidade de serviços disponíveis para atendimento. Sendo assim, uma das restrições define que todo serviço disponível para atendimento deve necessariamente estar alocado a um veículo para atendimento. Somado a isto, somente um veículo deve ser designado para cada atendimento e que cada serviço ocupa apenas uma posição sequencial de execução.

Para a construção do problema, dois vetores se tornam as principais variáveis de decisão do problema. São eles  $NV$  e  $NS$ .  $NV$  define em que veículo (de um total  $qv$  veículos disponíveis) a nota  $n$  será atribuída, e  $NS$  a sequência que ela será executada.

$$NV = \left| NV(1) \quad NV(2) \quad \dots \quad NV(n) \right| \quad (3.2)$$

Onde

$$1 \leq NV(i) \leq qv;$$

$$1 \leq i \leq n;$$

$$NS = \left| NS(1) \quad NS(2) \quad \dots \quad NV(n) \right| \quad (3.3)$$

Onde

$$1 \leq NS(i) \leq n;$$

$$1 \leq i \leq n;$$

O vetor  $NV$  foi consituído de forma que a posição do vetor identifique a nota de serviço e o valor atribuído em cada posição o identificador do veículo o qual será atribuído o atendimento. No caso do vetor  $NS$ , as posições também representam cada nota de serviço e o valor atribuído a sequência global que cada uma será executada.

Como exemplo, será indicado o preenchimento das matrizes para 2 veículos e 4 notas de serviço. As notas 1 e 3 serão atendidas pelo veículo 1 e as notas 2 e 4 pelo veículo

2. A sequência de execução será das notas (de modo crescente) 4, 3, 2, 1. O resultado do preenchimento das duas matrizes se dá pelas equações 3.4 e 3.5.

$$NV = \begin{vmatrix} 1 & 2 & 1 & 2 \end{vmatrix} \quad (3.4)$$

$$NS = \begin{vmatrix} 4 & 3 & 2 & 1 \end{vmatrix} \quad (3.5)$$

### 3.1.4 Modelos temporais e de distância

Em todas as simulações realizadas, serão introduzidas avaliações de distância e tempo em diferentes cenários. Entretanto, nos modelos utilizados neste trabalho, não estão especificadas unidades para ambos. Esta decisão foi tomada a partir do modelo base topológico utilizado: um plano cartesiano variando entre -200 e 200. Esta escolha, ainda que facilite a preparação de cenários fictícios, se distancia de valores factíveis.

Para as simulações não perderem verossimilhança e gerarem resultados desconectados da realidade de atendimento em campo, definiu-se que dados de tempo assumiriam valores em função da distância. Esta escolha deu-se porque ambos modelos, tanto o de minimização de distância quanto o de minimização do custo global, utilizam o somatório de distâncias percorridas para cálculo da função objetivo.

Em exemplos reais de atendimento em campo de uma distribuidora, deslocamentos para atendimento podem variar entre 5 minutos e 120 minutos, aproximadamente. Sobre a duração dos atendimentos, estes podem variar entre 10 e 300 minutos. A mediana dos deslocamentos aproxima-se de 15 minutos e a de execução de 60 minutos. Todas estas faixas foram extraídas de histórico de atendimentos de uma distribuidora real de energia elétrica com uma rede de distribuição diversificada: atendimentos em áreas rurais e urbanas, com deslocamentos curtos e longos.

Nas simulações utilizadas, foram utilizados os tempos padrões de 0, 250 e 500. Em um plano cartesiano de 200 notas, a distância entre notas oscila entre 50 e 150 (dependendo do volume de notas na simulação). Sendo assim, os valores de tempo de execução (que no final são função da distância), ainda que sem unidade definida, são factíveis no modelo. O mesmo se aplica às funções objetivos: elas não tem unidade definida em nenhum dos modelos, mas guarda relações de proporção reais, informação essencial para avaliação qualitativa das simulações.

## 3.2 Modelo #1: Minimização das distâncias percorridas

Este primeiro modelo, conforme introduzido anteriormente, objetiva a minimização das distâncias percorridas para atendimento. Como variáveis de entrada, existem a quantidade de viaturas disponíveis para atendimento (representadas por  $qv$ ), quantidade

de serviços disponíveis para atendimento (representados por  $qn$ ) e respectivas posições geográficas. A equação 3.6 indica a função objetivo do primeiro problema.

$$Min f(x)_1 = \sum_{v=1}^{qv} \sum_{n=1}^{qn} D(n-1, n) \quad (3.6)$$

Onde:

$v$  = variável viatura;

$qv$  = quantidade de viaturas disponíveis;

$n$  = nota de serviço a ser executada;

$qn$  = quantidade de notas de serviços a serem executadas;

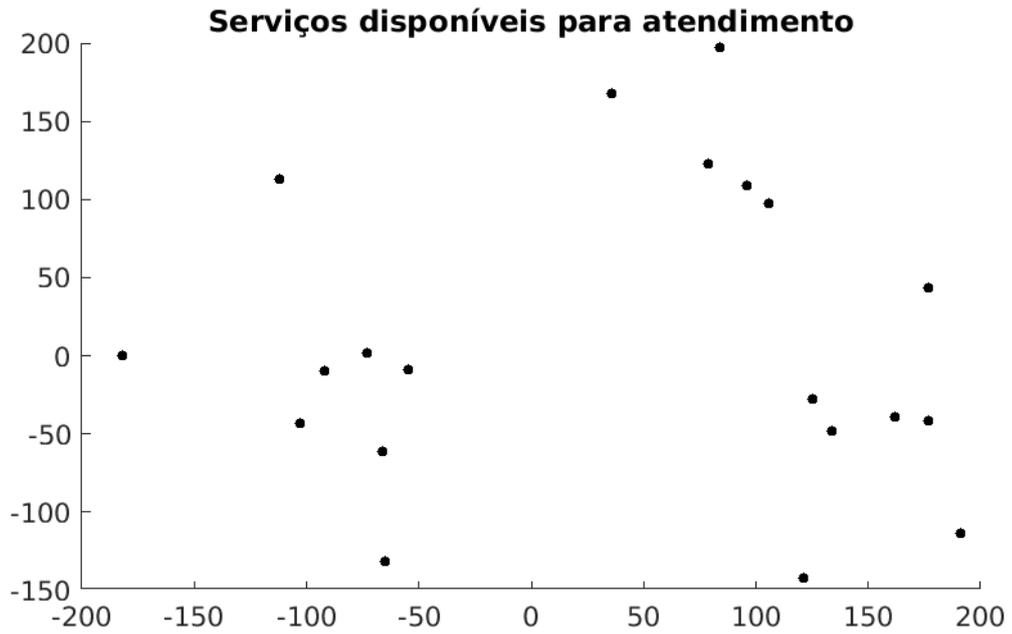
$D$  = matriz distância entre notas de serviço.

### 3.2.1 Heurística para solução do problema de minimização de distâncias

A heurística desenvolvida para o primeiro modelo trata de uma utilização híbrida da heurística de Gillet e Miller (1974) e de busca do vizinho mais próximo. A heurística de Gillet e Miller é utilizada para clusterização das notas de serviço para limitação geográfica de atendimento de cada veículo. Após a separação, é utilizada a segunda heurística para a busca de um mínimo local limitado a cada *cluster*. Esta alternativa reduz significativamente o custo computacional do algoritmo, já que reduz um problema de roteirização de  $qv$  veículos a  $qv$  problemas de roteirização de um veículo apenas.

Inicialmente, os serviços foram divididos em *clusters* tendo como referência suas coordenadas polares em relação ao ponto de partida, que representa a estação avançada (EA) de partida dos veículos no início de suas jornadas de trabalho. Parte-se, inicialmente, de um vetor de ângulo 0 para formar os *clusters* de atendimento do indivíduo original.

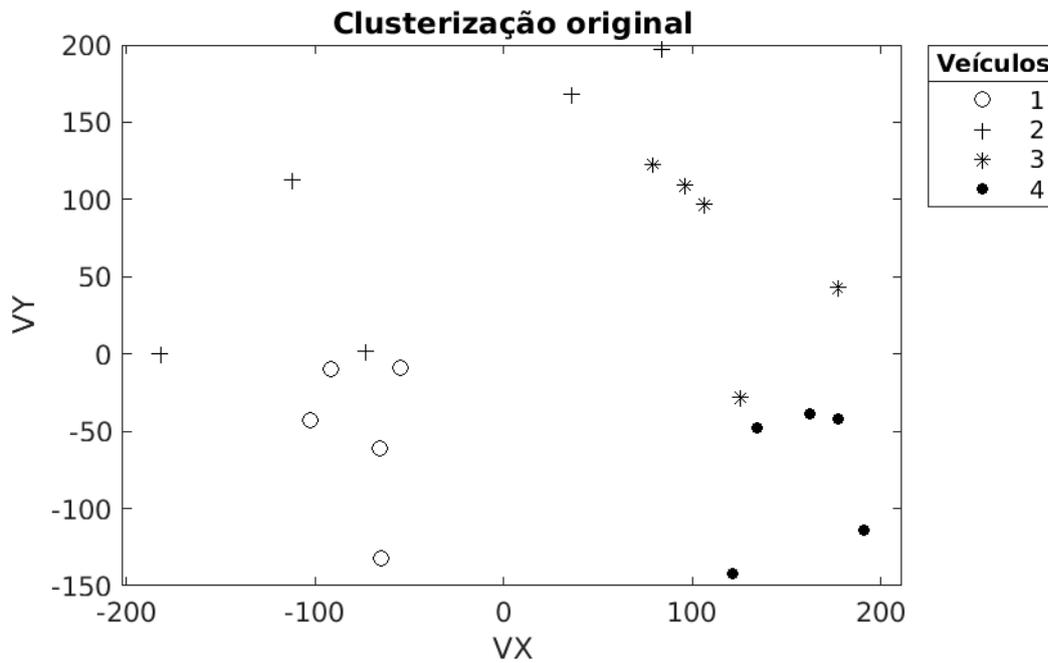
Como exemplo inicial, foi simulado o algoritmo do primeiro modelo para o atendimento de 20 notas de serviço por 4 diferentes veículos. A disposição geográfica das notas de serviço está indicada na figura 3.3.

**Figura 3.3.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento

Fonte: Autor

Realizando a divisão inicial por *clusters* a partir de suas coordenadas polares, obtém-se 4 diferentes grupos (número igual ao número de veículos) agrupados em distâncias similares. Esta representação inicial está representada na figura 3.4. A partir desta configuração inicial, é executada a heurística de busca do vizinho mais próximo para cada grupo separadamente.

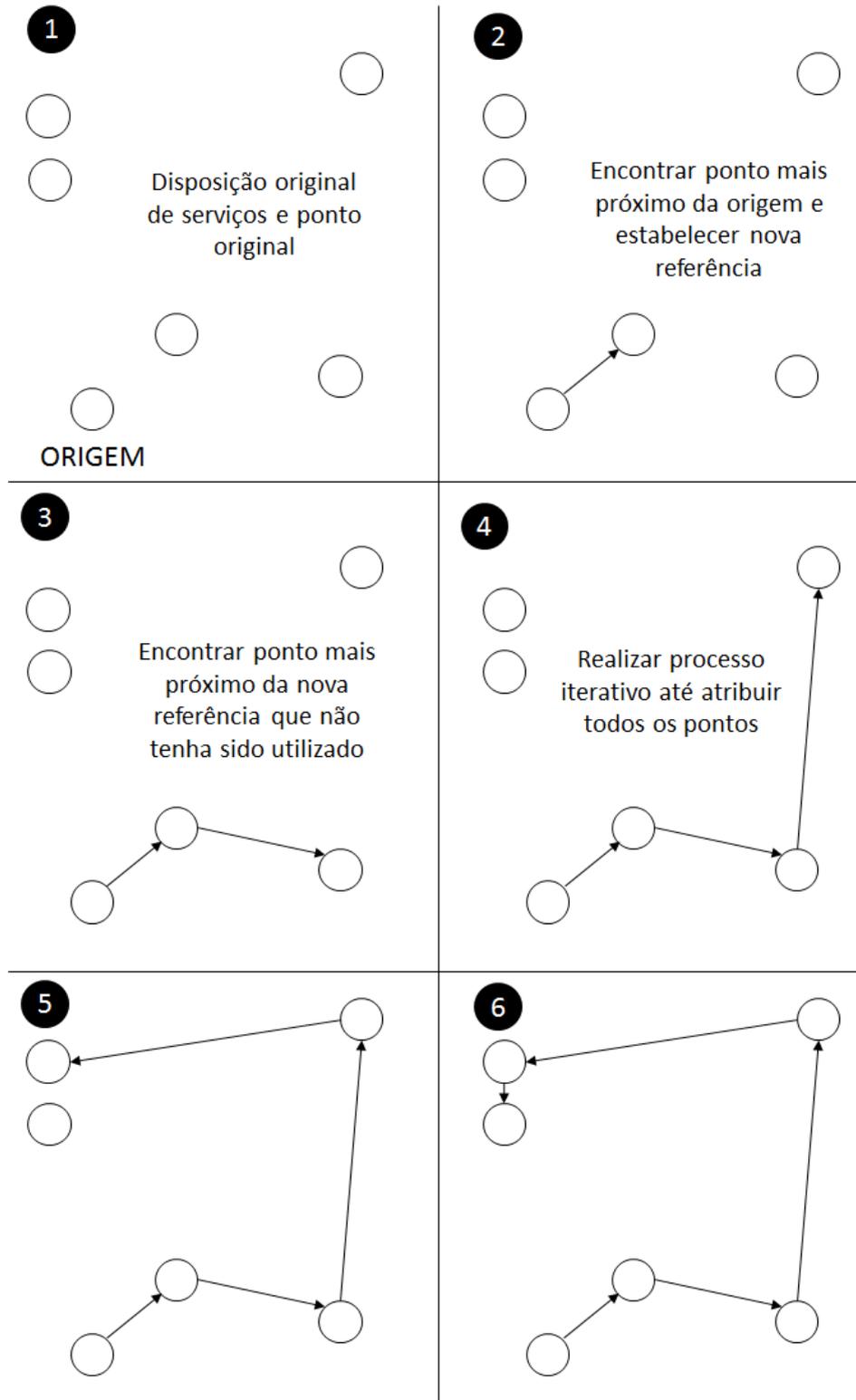
**Figura 3.4.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Divisão inicial em quatro *clusters* para atendimento



Fonte: Autor

A heurística de busca do vizinho local é uma heurística simples mas que, para problemas de roteirização radial, como atual problema onde a origem é no centro e as rotas são realizadas em direção aos extremos, tem ótima eficiência. Inicialmente, é encontrado o ponto mais próximo da origem, representando a base de saída das equipes. A partir deste novo ponto, é encontrado o serviço mais próximo, agora da nova referência. Este processo é realizado de forma construtiva e sequencial até que se findem os pontos de cada grupo. Este processo é realizado para cada um dos *clusters* de forma independente. A figura 3.5 representa um exemplo do processo iterativo de montagem de um roteiro utilizando o modelo utilizado no algoritmo.

**Figura 3.5.** Sequência de decisões do processo de busca pelo vizinho mais próximo

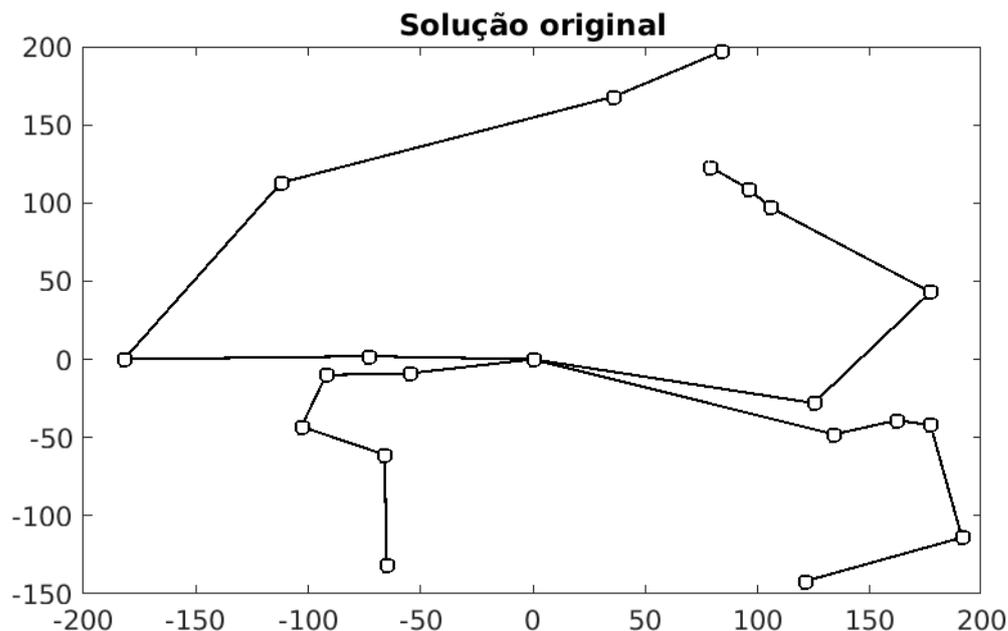


Fonte: Autor

Após este passo, é possível obter uma solução factível para o problema, atribuindo cada nota de serviço a um veículo único e respeitando as restrições do problema. Esta representação da solução original está indicada na figura 3.6. É possível então calcular a

função objetivo desta solução, que é o somatório de todas as distâncias percorridas por cada um dos veículos.

**Figura 3.6.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Solução original do problema



Fonte: Autor

Ainda que a função de busca local seja relativamente inflexível, visto que é possível simular buscas locais alternativas como o conceito de inserção de vértices que tragam maiores economias, como nas heurísticas de Clarke e Wright (1964) e Mole e Jameson (1976), o ganho na função objetivo não é significativo. Isto acontece porque a divisão em *clusters* restringe bastante a gama de soluções possíveis para o problema. Por isto, nesta modelagem decidiu-se por variar os *clusters* para obter resultados completamente diferentes, mas respeitando regras de definição de áreas de formação de rotas. Por exemplo, não é coerente para um problema de roteamento de veículos manter em um mesmo grupo pontos que diferem completamente em suas referências polares.

Para variar os grupos, foi estabelecido um movimento denominado *giro polar* para troca de vértices entre grupos. Conforme introduzido anteriormente, a solução original tem como referência a nota de serviço mais próxima do ângulo zero em relação à referência. A partir deste ponto são selecionados os grupos a partir de uma quantidade equilibrada de pontos por grupo e mantendo os que tem maior afinidade angular nos mesmos quadrantes. O primeiro *giro polar* transfere um vértice que esteja no extremo de um grupo para o grupo subsequente. Computacionalmente, este movimento troca um ponto por outro, mas visualmente o modelo aparenta ter realizado um *giro polar* entre os pontos geográficos.

As figuras 3.4, 3.7 e 3.8 indicam, respectivamente, a configuração original dos grupos para roteamento, o resultado da primeira iteração e o da segunda iteração após as trocas de vértices entre grupos ou *giros polares*. A cada interação, tem-se uma solução completamente diferente da anterior visto que os grupos geográficos de pontos são bem distintos. Entretanto, existe uma limitação possível de diferentes cenários para simulação. Este efeito acontece porque as trocas entre pontos aborda sempre os extremos de cada grupo, então as configurações passam a se repetir após  $It_{max}$  iterações, que é definido conforme equação 3.7.

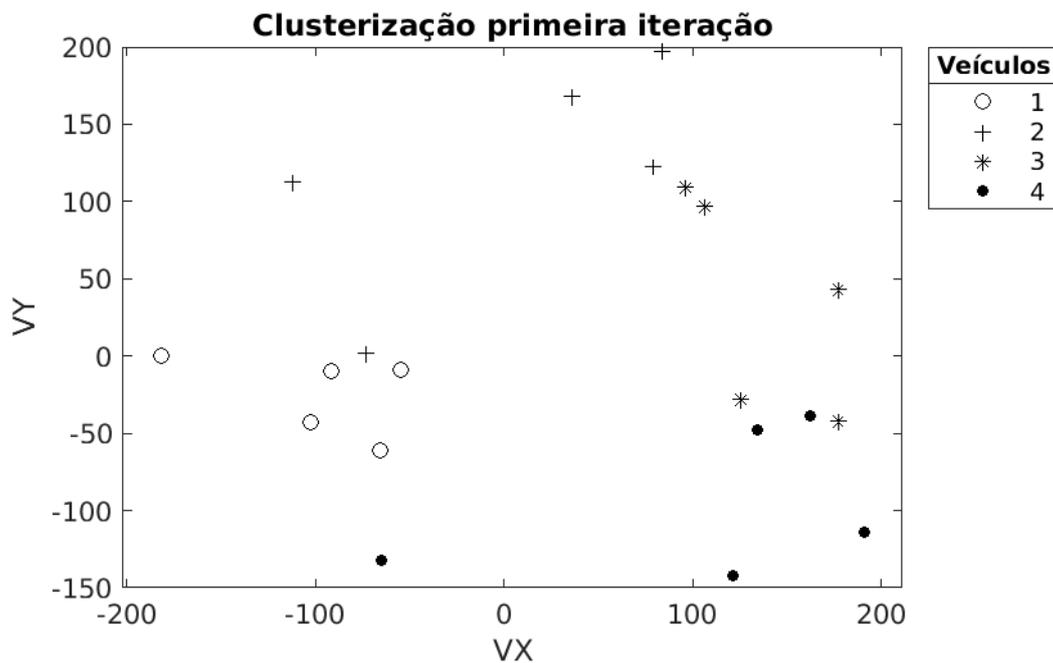
$$It_{max} = \frac{qn}{qv} \quad (3.7)$$

Onde:

$qv$  = quantidade de viaturas disponíveis;

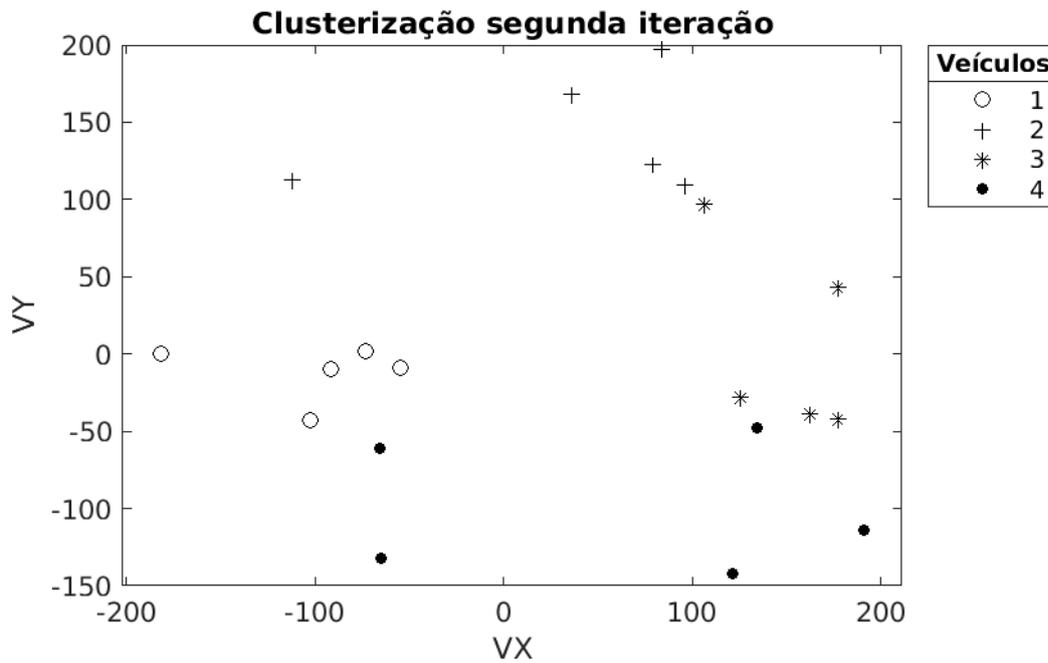
$qn$  = quantidade de notas de serviços a serem executadas.

**Figura 3.7.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Resultado da primeira iteração



Fonte: Autor

**Figura 3.8.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Resultado da segunda iteração



Fonte: Autor

Findadas todas as  $It_{max}$  iterações possíveis antes do processo se tornar periódico, é possível avaliar a melhor configuração de agrupamento de serviços. No exemplo exposto, considerando 20 notas de serviço para 4 veículos, tem-se 5 iterações possíveis para gerar cenários únicos. As figuras 3.9 e 3.10 indicam, respectivamente, a configuração da melhor solução de despacho encontrada para o problema, e a evolução do valor da função objetivo e o valor da incumbente ao longo das interações. Para indicar a repetibilidade de cenários, foram simulados dois ciclos de *giro polar*, assim os valores se repetem a partir da sexta iteração.

A partir da figura 3.10, nota-se a variabilidade do valor da função objetivo com a mudança dos *clusters*. O valor da função objetivo resultante de cada cenário se dá entre 974 e 1265, o que representa quase 30% de variação. A conclusão é que o método desenvolvido, ainda que permita poucas iterações pela ocorrência da repetibilidade, cria cenários inéditos a cada mudança (desde que o ciclo de giro não seja completo).

A seguir, está detalhado o algoritmo híbrido utilizado para este primeiro modelo, primeiro realizando a separação em *clusters* e executando a heurística do vizinho mais próximo para cada grupo. O modelo foi desenvolvido e simulado em MATLAB.

---

**Algorithm 4** Pseudocódigo do algoritmo do Modelo #1: Gillet e Miller / Busca vizinho mais próximo

---

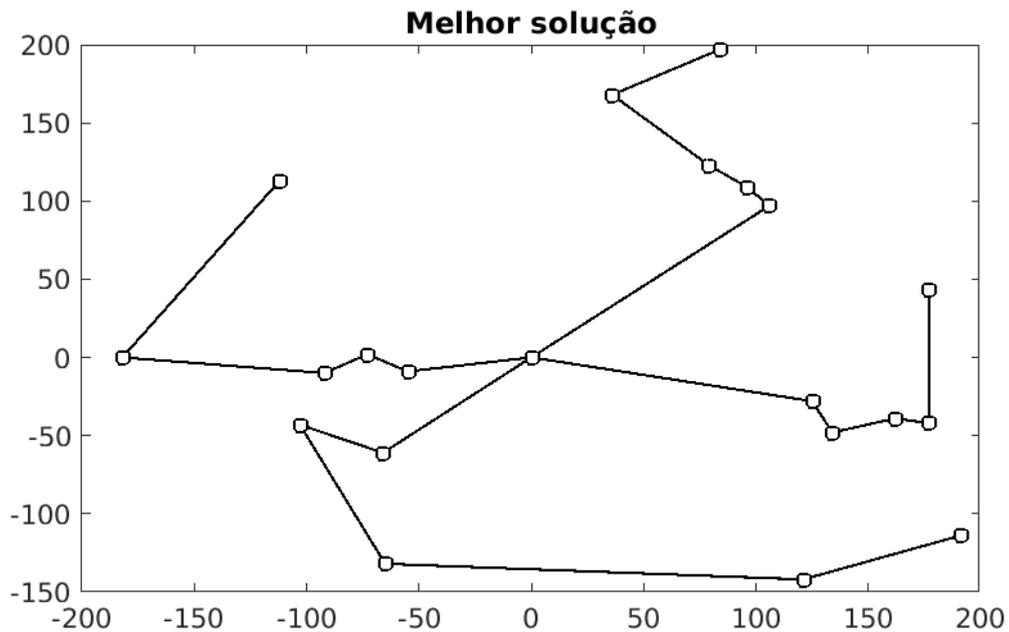
```

1: Inicializa matriz  $D$ ;
2: Inicia contador de interações de giro polar ( $c$ );
3: for  $c = c_1 \leftarrow It_{max}$ , número máximo de giros inéditos do
4:   Realiza divisão das notas de serviços em respectivos clusters;
5:   Inicializa seleção do cluster  $q$ ;
6:   for  $q = q_1 \leftarrow q_n$  do, visitando todos os clusters;
7:     Selecionar a nota do cluster  $q$  mais próximo da origem
8:     for Nota de serviço  $n_i = n_1 \leftarrow n_n \in q$  do
9:       Percorre todas as notas de serviço do cluster para encontrar a mais próxima
da nota  $n_i$ ;
10:      if Verifica se a nota de serviço  $n_{i+1}$  já foi atribuída then
11:        Busca próxima nota;
12:      else
13:        Atribui nota  $n_{i+1}$  na rota do cluster  $q$ ;
14:      end if
15:    end for
16:  end for
17: end for

```

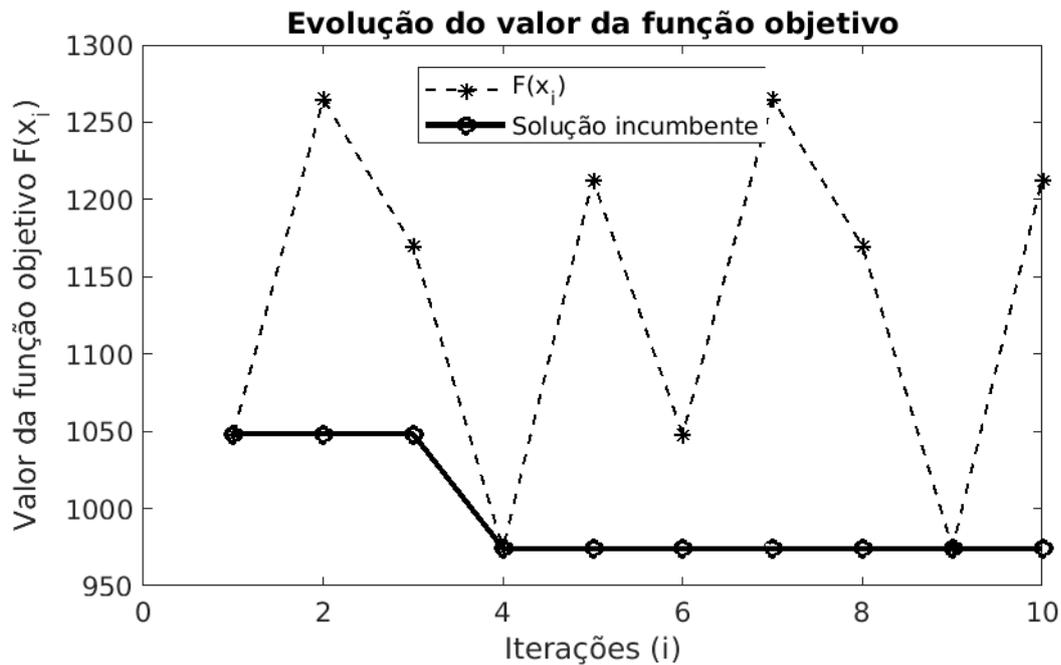
---

**Figura 3.9.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Melhor solução do problema



Fonte: Autor

**Figura 3.10.** Exemplo 20 notas disponíveis para atendimento. Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração



Fonte: Autor

### 3.3 Modelo #2: Minimização do custo global de atendimento

O segundo utilizará também como insumo, além das variáveis citadas anteriormente, a prioridade de cada serviço. Entretanto, o objetivo agora é minimizar o custo global da função objetivo, que considera o tempo previsto de execução de cada serviço, relacionado diretamente à sequência de atendimento definida para cada um. A equação 3.8 indica a nova função objetivo.

$$\text{Min}f(x)_2 = \sum_{v=1}^{qv} \sum_{n=1}^{qn} T(n-1, n) \times P_n \quad (3.8)$$

Onde:

$v$  = variável viatura;

$qv$  = quantidade de viaturas disponíveis;

$n$  = nota de serviço a ser executada;

$qn$  = quantidade de notas de serviços a serem executadas;

$T$  = matriz tempo entre notas de serviço;

$P$  = matriz prioridade definida para cada nota de serviço.

### 3.3.1 Métodos decisórios aplicados à priorização de serviços de uma distribuidora de energia

O processo de tomada de decisão associado ao despacho e priorização de serviços de uma distribuidora de energia elétrica é extremamente complexo e o nível de complexidade aumenta à medida que as equipes de campo estão condicionadas a realizarem diferentes tipos de serviços.

Existem distribuidoras de energia que dividem as equipes de campo em funções específicas, como por exemplo equipes que só atendem faltas de energia, equipes que só atendem serviços comerciais regulados e equipes que trabalham somente com ordem de serviços de corte e religação. Neste modelo de trabalho, apesar de evoluir em eficiência pois tem-se equipes extremamente especializadas, perde-se bastante em deslocamentos para os atendimentos. Além disto, este cenário não é aplicável em municípios ou regiões menores que não são compatíveis com tamanha especialização.

Sendo assim, cada vez mais empresas de energia migram para um modelo de trabalho multifuncional, no qual as equipes são instruídas, capacitadas e têm materiais para executar quaisquer tipos de serviço estabelecidos dentro de uma carteira prévia de trabalho. As equipes podem, assim, realizar tanto atendimentos comerciais regulados, emergenciais, de combate à inadimplência e perdas comerciais.

Ainda que este modelo reduza deslocamentos globais das equipes, surge uma nova questão inerentes a processos de despacho tão heterogêneos: como priorizar corretamente os atendimentos em campo, visto que um despacho otimizado está associado à utilização de  $n$  critérios subjetivos, que não necessariamente podem ser comparáveis.

Para ilustrar a subjetividade, é possível comparar atendimentos comerciais e emergenciais. Ainda que ambos possam ser convertidos em valor financeiro, esta avaliação não retrata exatamente o impacto multidimensional que cada um exerce. Exemplificando: tanto serviços comerciais quanto emergenciais estão associados diretamente às seguintes parcelas financeiras: custo de deslocamento das equipes de campo para atendimento (em função do tempo), incluindo valor do homem-hora, combustível, depreciação veicular, entre outros, e o custo de violação do potencial atraso no atendimento, seja ele comercial ou emergencial. Somados a estas parcelas estão aspectos intangíveis financeiramente, como a imagem da empresa perante demais clientes, potenciais reclamações junto à agência reguladora relacionados à perda de prazos de serviços, entre outros.

Entretanto, parcelas não tangíveis, como o índice de satisfação do cliente quando da execução do serviço e o valor consolidado dos serviços atendidos dentro do prazo de uma distribuidora no ano, são igualmente ou até mais importantes. Estes índices são avaliados periodicamente pela ANEEL e podem, caso performem abaixo de valores esperados para determinadas concessões, estar sujeitos a penalidades que podem acarretar em processos administrativos junto aos controladores das distribuidoras.

O mesmo acontece com atendimentos a serviços emergenciais. Existem as mesmas parcelas de custo operacional envolvidas (custo associado a homem-hora e veicular envolvidos, também em função do tempo) e os valores referentes à Compensação por Continuidade (ANEEL, 2007b).

### 3.3.2 Critérios definidos para avaliação e comparação

Neste trabalho, foram definidos sete diferentes critérios para descrever o mais fielmente possível o processo decisório diário de priorização de serviços. Alguns critérios possibilitam a definição de valores numéricos existentes em um determinado *range*, entretanto outros são critérios subjetivos e para aplicação dos métodos decisórios que foram transportados para valores numéricos que representam as possibilidades de escolha. A seguir, cada um dos critérios selecionados será detalhado.

#### 3.3.2.1 Critério quantidade de clientes interrompidos

O critério *quantidade de clientes interrompidos* é aplicável somente a serviços emergenciais e tem um valor numérico estabelecido a partir de um range que varia, teoricamente, entre 1 e o número máximo de clientes de uma concessão de energia. Isto ocorre porque uma ocorrência emergencial pode ser relevante o suficiente para afetar todos os consumidores de uma concessão. Como esta possibilidade é praticamente ínfima para grandes concessões, é possível estipular uma variação máxima entre 1 e 5000, que é um número médio de clientes existentes em um circuito alimentador. Valores acima do escolhido elevam muito a prioridade da ocorrência, o que torna o processo de seleção irrelevante neste contexto.

Indicadores que relacionam clientes interrompidos com tempo são um dos principais índices que definem a qualidade de uma concessionária de energia. Em ANEEL (2007b), o indicador duração equivalente de interrupção (DEC) é representado pela equação 3.9. Este indicador, em resumo, calcula quanto em média cada unidade consumidora (UC) de um determinado universo de apuração ficou interrompido.

No contexto deste problema de priorização, quanto mais clientes ficam interrompidos, maior o DEC, que é calculado a partir de uma função envolvendo também tempo, conforme ANEEL (2007b):

$$DEC = \frac{\sum_{i=1}^{C_c} DIC(i)}{C_c} \quad (3.9)$$

Onde:

$DEC$  = duração equivalente de interrupção por UC, expressa em horas

$i$  = índice de UC atendidas em BT ou MT faturadas

$C_c$  = número total de unidades consumidoras faturadas no período de apuração

$DIC(i)$  = Duração de Interrupção Individual por UC

### 3.3.2.2 Critério EUSD total

O encargo de uso do sistema de distribuição (EUSD) é definido em ANEEL (2007a) como *valor, em moeda corrente nacional, devido pelo uso das instalações de distribuição e calculado pelo produto da tarifa de uso pelos respectivos montantes de uso do sistema de distribuição e de energia contratados ou verificados*.

O EUSD é o indicador base para multas compensatórias de atrasos de serviços, tanto emergenciais quanto comerciais. Para os emergenciais, multas compensatórias são avaliadas em relação a tempo ou frequência de interrupção, a partir dos indicadores DIC, FIC, DMIC e DICRI, cujas definições estão detalhadas nas equações 3.11, 3.13, 3.12, 3.14.

O crédito por violação dos limites de continuidade é dado pela equação 3.10, igualmente definido a partir de ANEEL (2007b). Ele indica uma compensação financeira aos consumidores que foram afetados por interrupções de energia não programadas que ultrapassaram limites definidos pela regulação.

O critério EUSD total tem relação direta com multas financeiras. Erroneamente, muitas vezes este critério é definido como um dos principais fatores na definição da priorização de execução de um determinado serviço, pois é um dos poucos que trata o fator financeiro de forma tão direta e objetiva. Entretanto, é um fator que não considera todos os impactos de imagem, sociais e financeiros de longo prazo a exemplo de multas pela ANEEL por não cumprimento de metas de DEC estabelecidas.

$$Credito = \frac{EUSD}{730} \times \frac{P_v}{P_p} \times 100 \quad (3.10)$$

Onde

$EUSD$  = Encargo de Uso do Sistema de Distribuição relativo ao período de apuração;

$P_v$  = Prazo verificado do atendimento comercial;

$P_p$  = Prazo normativo do padrão de atendimento comercial;

Para DIC:

$$DIC = \left( \frac{DIC_p}{DIC_v} - 1 \right) * DIC_p * \frac{EUSD}{730} * kei \quad (3.11)$$

Para DMIC:

$$DMIC = \left( \frac{DMIC_p}{DMIC_v} - 1 \right) * DMIC_p * \frac{EUSD}{730} * kei \quad (3.12)$$

Para FIC:

$$FIC = \left( \frac{FIC_p}{FIC_v} - 1 \right) * FIC_p * \frac{EUSD}{730} * kei \quad (3.13)$$

Para DICRI:

$$DICRI = \left( \frac{DICRI_p}{DICRI_v} - 1 \right) * DICRI_p * \frac{EUSD}{730} * kei \quad (3.14)$$

Onde:

$DIC_v$	= duração de interrupção por UC
$DIC_p$	= limite de continuidade estabelecido no período para o indicador DIC
$DMIC_v$	= duração máxima de interrupção contínua por UC
$DMIC_p$	= limite de continuidade estabelecido para duração máxima de interrupção
$FIC_v$	= frequência de interrupção por UC
$FIC_p$	= limite de continuidade estabelecido para frequência de interrupção
$DICRI_v$	= duração da interrupção individual ocorrida em Dia Crítico por UC
$DICRI_p$	= limite de continuidade estabelecido para interrupção em Dia Crítico
$EUSD_{mdio}$	= média aritmética dos EUSD do período
730	= número médio de horas no mês
$kei$	= coeficiente de majoração cujo valor deve ser fixado em 15, 20 ou 27

### 3.3.2.3 Critério localização

Localização é o primeiro critério subjetivo da relação a ser representado por índices. No despacho de serviços de uma distribuidora, serviços são separados, geograficamente, em dois níveis apenas: urbano e rural. Ocorrências urbanas são prioritárias porque tem um impacto de imagem mais relevante e conseguem otimizar melhor a utilização das equipes em um aspecto estocástico: equipes de campo localizadas em perímetros urbanos estão mais sujeitas a um menor deslocamento para o atendimento da próxima ocorrência emergencial porque a probabilidade do próximo atendimento ser urbano é superior à probabilidade de ser em perímetro rural.

Por outro lado, dimensionar o quão relevante é avaliar a localização de atendimento de uma ocorrência é uma tarefa complexa, pois deve materializar os aspectos subjetivos de priorização citados anteriormente.

### 3.3.2.4 Critério quantidade de clientes críticos

Apesar de ser um critério mensurável diretamente, pois quantifica os clientes críticos envolvidos em um determinado serviço, ele tem um aspecto subjetivo muito mais latente que simplesmente o valor numérico. Isto se deve à própria definição informal de clientes críticos para uma distribuidora de energia elétrica. Clientes críticos são aqueles que demandam um atendimento mais ágil pois são mais dependentes de energia elétrica que os demais. Podem ser listados como clientes críticos hospitais, UTIs domiciliares, etc.

Ingressam também na lista de consumidores críticos aqueles com alto poder de influência na imagem das companhias de energia. Podem ser indicados como exemplos prefeituras, fóruns de justiça, câmaras municipais, sedes de emissoras televisivas, entre outros.

Dimensionar o impacto e prioridade de haver um destes consumidores especiais envolvido em um serviço emergencial ou comercial é muito complexo, pois além de tratar do aspecto da imagem da empresa, afeta também o papel social de uma concessionária de energia, que é manter a disponibilidade para todos os consumidores, em especial àqueles que dependem vitalmente dela todos os dias.

### 3.3.2.5 Critério tempo de atendimento de uma ocorrência emergencial

Este critério é aplicável somente a serviços emergenciais e é baseado em um indicador Tempo Médio de Atendimento a Emergências (TMAE) já definido em ANEEL (2007a) como *valor médio correspondente aos tempos de atendimento a ocorrências emergenciais (TAE) das equipes de emergência, para o atendimento às ocorrências emergenciais verificadas em um determinado conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado, correspondendo à soma dos tempos TMP, TMD e TME*. TMP, TMD e TME são tempos parciais das ocorrências e podem ser definidos como:

- Tempo Médio de Deslocamento (TMD):
  - *Valor médio correspondente aos tempos de deslocamento (TD) das equipes de emergência, para o atendimento às ocorrências emergenciais verificadas em um determinado conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado (ANEEL, 2007a).*
- Tempo Médio de Execução (TME):
  - *Valor médio correspondente aos tempos de execução (TE) pelas equipes de emergência, para o atendimento às ocorrências emergenciais verificadas em um determinado conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado (ANEEL, 2007a).*
- Tempo Médio de Preparação (TMP):
  - *Valor médio correspondente aos tempos de preparação (TP) das equipes de emergência, para o atendimento às ocorrências emergenciais verificadas em um determinado conjunto de unidades consumidoras, no período de apuração considerado (ANEEL, 2007a).*

Além de se tratar de um indicador regulado e acompanhado pela agência reguladora, é reflexo da imagem da qualidade percebida de atendimento pelos consumidores da área de concessão.

Exemplificando, se a maioria dos clientes é atendida rapidamente e um cliente fica mais um tempo elevado sem fornecimento de energia, por exemplo na escala de dias,

a imagem da empresa, bem como o seu papel social de reestabelecer atendimento de falta de energia o mais rápido possível, são afetados negativamente.

Por isto, existe um limite de tempo de atendimento no qual uma ocorrência passa a ter uma prioridade muito superior às demais, mesmo com atributos de quantidade de clientes interrompidos e EUSD total inferiores.

### **3.3.2.6 Critério evento de risco**

Este critério é subjetivo e é definido entre dois valores possíveis: há possibilidade de risco envolvido ou não há possibilidade. O critério trata da possibilidade porque é exatamente esta a decisão de despacho de um serviço com risco: a sua probabilidade de ser um risco real.

O fato de que eventos de risco são prioritários para companhias de energia acaba abrindo brechas para consumidores que conhecem esta regra fazerem mal uso deste cenário e indicarem risco em ocorrências cotidianas simplesmente para terem prioridade no atendimento. Eventos tidos como improcedentes são classificados a partir de apontamentos realizados pelas equipes de campo para encerramentos de atendimentos nos quais não houve ação nenhuma da equipe. Por exemplo, um consumidor leigo pode abrir um chamado para atendimento de um fio partido no solo para um cabo telefônico.

Assim, se as distribuidoras atendessem de modo invariavelmente prioritário todos os eventos com quaisquer tipos de risco indicados, ocorrências com muitos consumidores envolvidos ou com clientes prioritários ficariam em segundo plano.

Por outro lado, qual é o limite do risco? Até que ponto uma distribuidora de energia está disposta a assumir o risco de enfileirar eventos com possibilidade de risco em detrimento de outros com critérios mais significativos? Seria mais importante despachar uma equipe para o evento citado anteriormente de fio partido que se revelou um deslocamento improcedente de cabo telefônico ou priorizar o desligamento de um religador envolvendo mais de mil consumidores incluindo indústrias e comércio?

### **3.3.2.7 Critério tempo de vencimento de serviços do Anexo III**

O critério tempo de vencimento de serviços do Anexo III se trata apenas de execuções de notas de serviços comerciais, mais especificamente aqueles listados no Anexo III de ANEEL (2010).

O documento ANEEL (2010) estabelece que as distribuidoras devem enviar mensalmente à ANEEL, até o último dia útil do segundo mês subsequente ao mês de apuração, *o extrato da apuração dos padrões dos indicadores comerciais de todas as unidades consumidoras*. Este indicador é acompanhado periodicamente em fiscalizações e a distribuidora, além de arcar com créditos ao consumidor por potenciais violações de prazos, está sujeita

a multas por parte da agência por não atender a critérios de qualidade mínimos esperados de uma concessionária de distribuição.

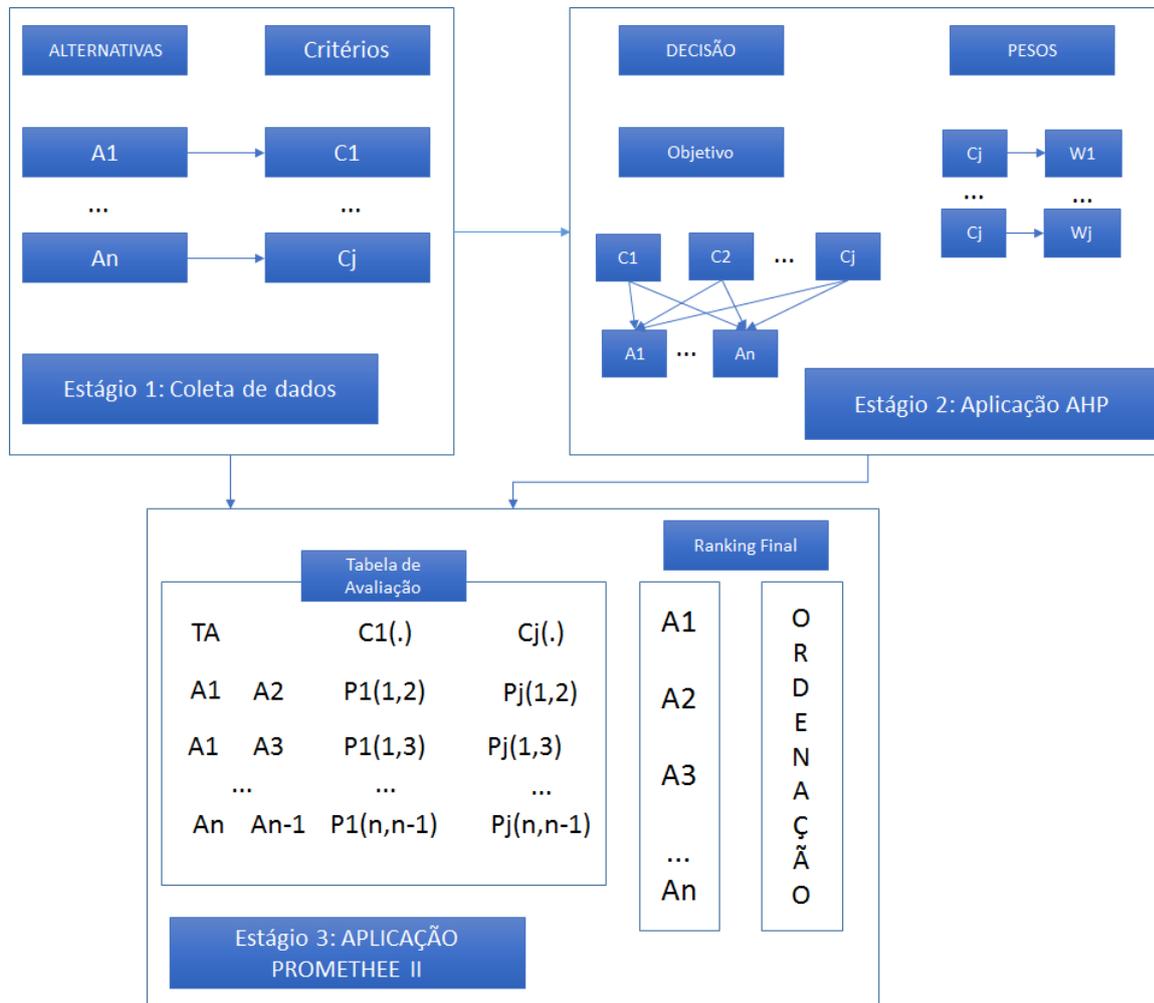
Em períodos sem grandes contingências, aproximadamente mais de 2/3 dos atendimentos de uma equipe multifuncional tratam-se de serviços comerciais, dentre eles pode-se citar ligações novas, pedidos de aumento ou redução de carga, desligamentos definitivos, bem como aquelas geridos e solicitados por áreas internas da empresa, como cortes de energia por inadimplência. Sendo assim, os serviços comerciais tratam-se de um montante significativo da ocupação das equipes de campo e, se não geridos e priorizados corretamente, causam grandes impactos na operação diária da companhia.

### **3.3.3 Utilização de métodos decisórios e ordenação global de serviços**

Para a configuração computacional dos métodos decisórios, foram utilizados dois softwares, primeiramente o Microsoft Excel para a modelagem do método AHP e o MATLAB para modelagem do método PROMETHEE II.

Os dois métodos, na modelagem deste problema, trabalham em série, inicialmente com a aplicação do método AHP para a avaliação de criticidade de cada atributo e o método PROMETHEE, sequencialmente, para ranquear as alternativas já com suas respectivas atribuições. A figura 3.11 detalha em formato de fluxo simplificado de informações, a interação entre os dois métodos.

**Figura 3.11.** Fluxograma simplificado de dados entre processos AHP e PROMETHEE II



Fonte: Autor

A primeira etapa diz respeito à coleta de informações de cada uma das alternativas em relação a cada um dos critérios. Conforme mencionado, alguns critérios são numéricos (como quantidade de clientes interrompidos) outros são subjetivos (como localização ou possibilidade de risco), que são transformados em avaliações numéricas (normalmente binários) para a caracterização do problema. As alternativas são indicadas por  $A_n$  e os critérios por  $C_n$ .

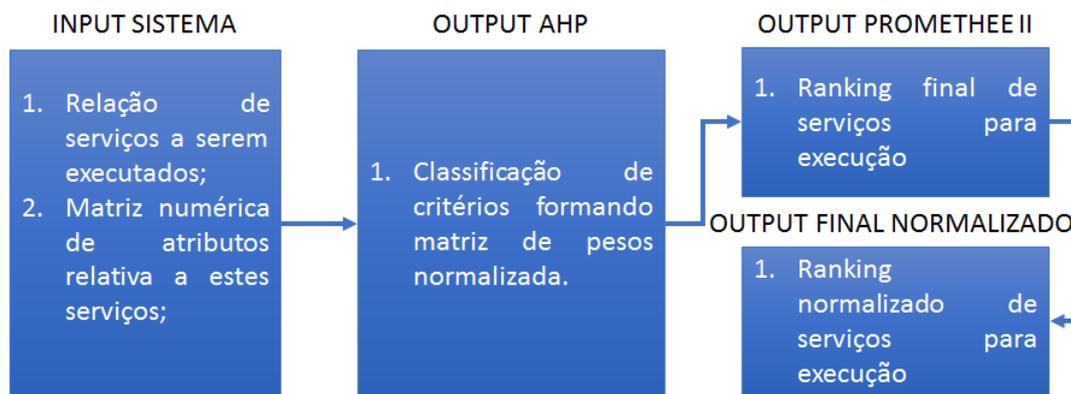
Subsequentemente, os critérios são transportados para aplicação do método AHP. Através da metodologia de comparação entre pares e seleção de valores da escala de Saaty para cada deles, é estabelecida uma matriz de pesos para cada um dos critérios. Os pesos são representados por  $W_n$  e os resultados são obtidos de forma normalizada, sendo assim, o somatório de pesos de todos os critérios equivalerá a 1.

Para a última etapa, a execução do método PROMETHEE II, são utilizados como dados de entrada todas as alternativas e valores de cada atributo, além dos pesos

de cada critério definidos pelo método AHP. De forma simplificada, foi indicada na figura 3.11 a tabela de avaliação, que na verdade inclui todos os passos relativos ao método: sequência comparativa ponderada pelos pesos dos critérios, cálculo de fluxos unilaterais sucedidas dos cálculos de fluxos globais. Ao final, tem-se a ordenação das  $A_n$  alternativas em ranking de forma comparativa.

A figura 3.12 indica o fluxo de entradas e saídas iniciais, parciais e finais dos métodos. Há a inclusão de uma etapa que foi desenhada para a utilização dos valores no algoritmo de otimização. Quando da montagem do ranking final de alternativas, há o aparecimento de valores negativos para classificação. Em aplicações que se limitem a ordenar as alternativas, este efeito não é um problema, mas neste trabalho estes pesos serão utilizados para ponderar a função objetivo, por isto os valores negativos não poderão aparecer. Para realizar este ajuste, a matriz é remodelada de forma que todos os valores sejam ponderados a partir do valor mais baixo.

**Figura 3.12.** Fluxograma simplificado global de entradas e saídas dos métodos



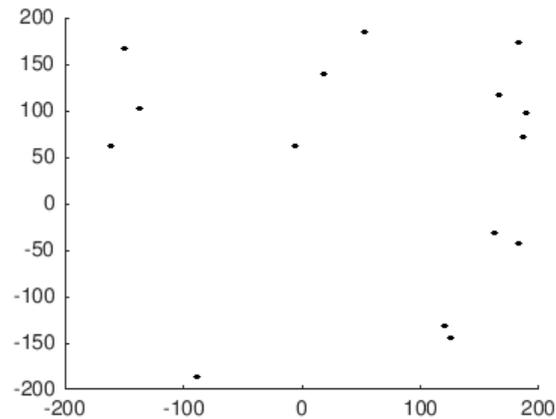
Fonte: Autor

A montagem desta lógica computacional foi elaborada no MATLAB para facilitar a interface com o algoritmo de otimização multicritério. Tem-se como entrada na solução MATLAB um vetor com pesos de critérios estabelecidos através do método AHP, a listagem de serviços e respectivos valores de atributos.

### 3.3.3.1 Exemplo de aplicação computacional do método decisório híbrido desenvolvido

Para simulação da lógica computacional decisória desenvolvida, será utilizado como exemplo o ranqueamento e classificação de 15 serviços para atendimento, conforme figura 3.14.

A primeira etapa do processo trata da utilização do método AHP para seleção dos critérios mais relevantes. A seguir, foram associados os critérios definidos para o projeto com respectivos índices para simulação:

**Figura 3.13.** Simulação de ranqueamento de 15 notas de serviço

Fonte: Autor

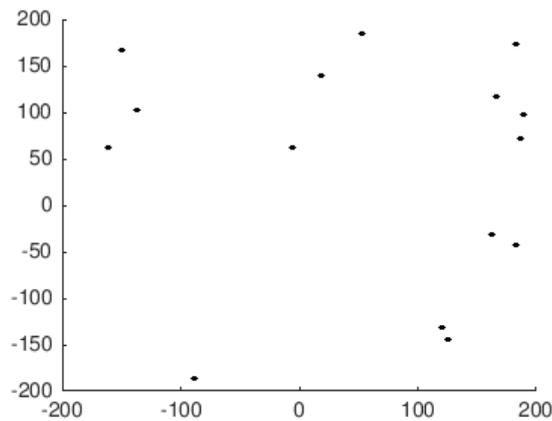
- $C_1$  - Critério 1: Quantidade de clientes interrompidos;
- $C_2$  - Critério 2: EUSD Total;
- $C_3$  - Critério 3: Localização;
- $C_4$  - Critério 4: Quantidade de clientes críticos;
- $C_5$  - Critério 5: Tempo de atendimento (para ocorrências emergenciais);
- $C_6$  - Critério 6: Possibilidade de risco;
- $C_7$  - Critério 7: Tempo de vencimento (para serviços listados no Anexo III).

Conforme estipulado pelo método AHP, os critérios foram comparados em pares e foi atribuído um determinado grau de importância entre 1 e 9 para cada uma delas. Neste exemplo, as avaliações foram preenchidas de forma arbitrária, mas com valores que correspondem a um cenário factível de priorização, dada a realidade atual das distribuidoras de energia. O objetivo, nesta simulação, não é exatamente calibrar de forma precisa cada um dos pesos dos critérios, mas sim criar um cenário real de priorização para exemplificar e testar o modelo computacional híbrido dos processos decisórios.

**Tabela 3.1.** Seleção de critérios para definição de árvore de comparação do método AHP

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$C_1$	1	7	9	2	4	1/5	7
$C_2$	1/7	1	7	2	3	1/7	5
$C_3$	1/9	1/7	1	1/6	1/6	1/9	1/5
$C_4$	1/2	1/2	6	1	3	1/7	7
$C_5$	1/4	1/3	6	1/3	1	1/9	2
$C_6$	5	7	9	7	9	1	9
$C_7$	1/7	1/5	5	1/7	1/2	1/9	1

Fonte: Autor

**Figura 3.14.** Simulação de ranqueamento de 15 notas de serviço

Fonte: Autor

A árvore de critérios gera uma resposta comparativa uniforme, na qual o somatório de pesos de todos os critérios é igual a 1. Os resultados são derivados da sequência de passos do método, que passa pelo cálculo do autovetor resultante para cada critério e depois pela normalização do resultado. No caso da simulação utilizada, os critérios e respectivos pesos estão listados na tabela 3.2.

**Tabela 3.2.** Lista de critérios e respectivos pesos normalizados

Critérios	Pesos
$C_1$	0,2150
$C_2$	0,1040
$C_3$	0,0160
$C_4$	0,1050
$C_5$	0,0530
$C_6$	0,4750
$C_7$	0,0320

Fonte: Autor

A segunda etapa foi estabelecer um algoritmo de preenchimento de critérios para notas de serviço (representadas por  $N_n$ ) a serem executadas. A extensão e seleção dos valores dos atributos segue um perfil verificado diariamente em uma distribuidora de energia. A tabela 3.3 indica os valores estabelecidos para cada posição critério - nota de serviço.

**Tabela 3.3.** Matriz de atributos de simulação de 15 notas de serviço

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$N_1$	1	700	1	1	3	1	0
$N_2$	8	450	1	1	5	0	0
$N_3$	0	680	1	0	0	0	4
$N_4$	35	760	1	0	15	0	0
$N_5$	960	150	1	1	14	0	0
$N_6$	244	200	1	0	23	0	0
$N_7$	59	290	2	1	14	1	0
$N_8$	1	940	1	0	13	1	0
$N_9$	1	530	1	0	20	0	0
$N_{10}$	75	230	2	0	11	0	0
$N_{11}$	0	1000	1	0	0	0	7
$N_{12}$	5	870	1	0	19	1	0
$N_{13}$	432	270	1	0	22	0	0
$N_{14}$	0	550	1	1	0	0	7
$N_{15}$	41	130	1	0	2	0	0

Fonte: Autor

Foi desenvolvido, de forma interna e paralela à solução computacional para o método PROMETHEE, mas também no MATLAB, um gerador aleatório de atributos. É importante ressaltar que o gerador de atributos não define valores totalmente aleatórios, mas tenta ser fiel ao perfil dos atributos verificados diariamente para uma carteira de atendimento normal de uma equipe de campo. Toda seleção passa por um valor aleatório entre 0 e 1, mas é direcionado conforme o perfil de cada atributo.

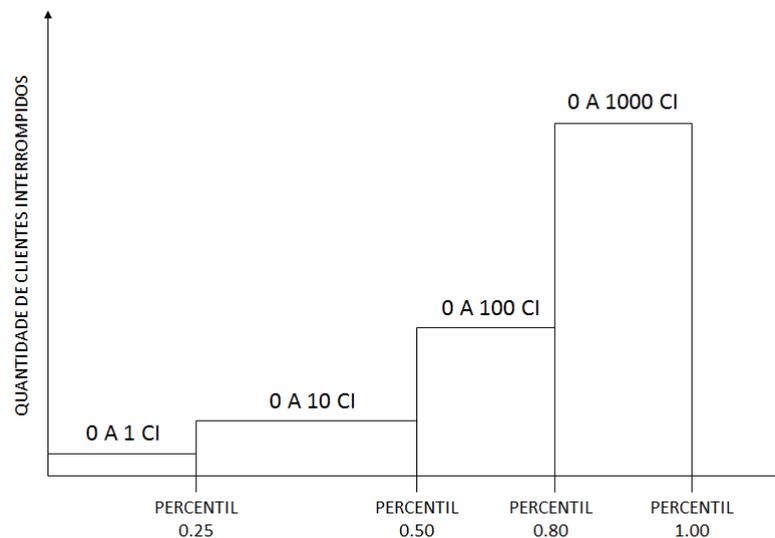
A primeira orientação é a seleção do tipo do serviço, se ele é comercial ou emergencial. Foi definido que valores selecionados acima de 0,75 seriam comerciais, correspondendo ao primeiro quartil da amostra. Caso o serviço seja realmente comercial, os critérios exclusivos emergenciais ( $C_1$  = quantidade de clientes interrompidos,  $C_5$  tempo de atendimento para ocorrências emergenciais e  $C_6$  possibilidade de risco) recebem valores nulos. Entretanto, o critério  $C_7$ , tempo de vencimento para serviços do Anexo III, recebe um valor inteiro aleatório entre 1 e 12 (valores que representam horas até o vencimento do serviço).

Já para serviços emergenciais, há a escolha dos demais critérios. Para o critério 1, quantidade de clientes interrompidos, foram definidas 3 diferentes faixas para seleção do valor: caso o valor aleatório (entre 0 e 1) seja maior que 0,8, há a seleção aleatória

entre valores de clientes interrompidos entre 0 e 1000. Caso o valor aleatório esteja entre 0,50 e 0,80, a seleção aleatória ocorre entre valores de clientes interrompidos entre 0 e 100. Caso a seleção aleatória esteja entre 0,25 e 0,50, a faixa de clientes interrompidos para seleção aleatória passa a ser entre 0 e 10. Já na faixa de seleção restante, menor que 0,25, o valor é fixado em 1 cliente interrompido. Estas faixas foram definidas de forma tão segregada para realmente caracterizar um histograma real de distribuição de serviços por faixa de cliente de uma distribuidora de energia.

A figura 3.15 resume o processo de seleção aleatória direcionada de valores do critério quantidade de clientes interrompidos.

**Figura 3.15.** Histograma simplificado da distribuição direcionada do critério quantidade de clientes interrompidos



Fonte: Autor

Em relação ao critério 5, tempo de atendimento, é selecionado um valor aleatório entre 0 e 24, valor indicado em horas que representa o range máximo verificado de duração de atendimento. Certamente a maioria das ocorrências se localiza nas primeiras faixas horárias, mas neste caso o objetivo é criar um espectro mais abrangente, tornando o processo decisório mais complexo.

Os critérios 2 (EUSD), 3 (localização) e 4 (quantidade de clientes críticos) são comuns tanto a atendimentos emergenciais quanto comerciais. Para o critério 2, foi definida uma faixa aleatória entre 10 e 500 (valores representados monetariamente em Reais) que representa o EUSD médio de cada cliente envolvido. Especificamente no caso de ocorrências emergenciais, onde há a possibilidade de mais consumidores estarem envolvidos, o valor total do atributo é igual ao definido randomicamente entre 10 e 500 multiplicado pelo total de consumidores afetados pela ocorrência em questão.

Por fim, é utilizado o método PROMETHEE II para definição do fluxo global

de cada nota de serviço. A partir do algoritmo definido em metodologia, o resultado do fluxo unificado se encontra na tabela 3.4. É possível concluir, por exemplo, que a nota de serviço indicada pelo índice 1 tem a maior prioridade e a nota de serviço indicada pelo número 15 tem a menor prioridade.

**Tabela 3.4.** Lista de serviços e respectivos pesos pós método PROMETHEE

SERVIÇO	PESO GLOBAL
$N_1$	6,0371
$N_2$	-1,4436
$N_3$	-3,0801
$N_4$	-2,0263
$N_5$	1,5277
$N_6$	-2,0519
$N_7$	5,6370
$N_8$	5,2381
$N_9$	-2,3802
$N_{10}$	-3,2206
$N_{11}$	-2,7121
$N_{12}$	5,3334
$N_{13}$	-1,3293
$N_{14}$	-1,9440
$N_{15}$	-3,5852

Fonte: Autor

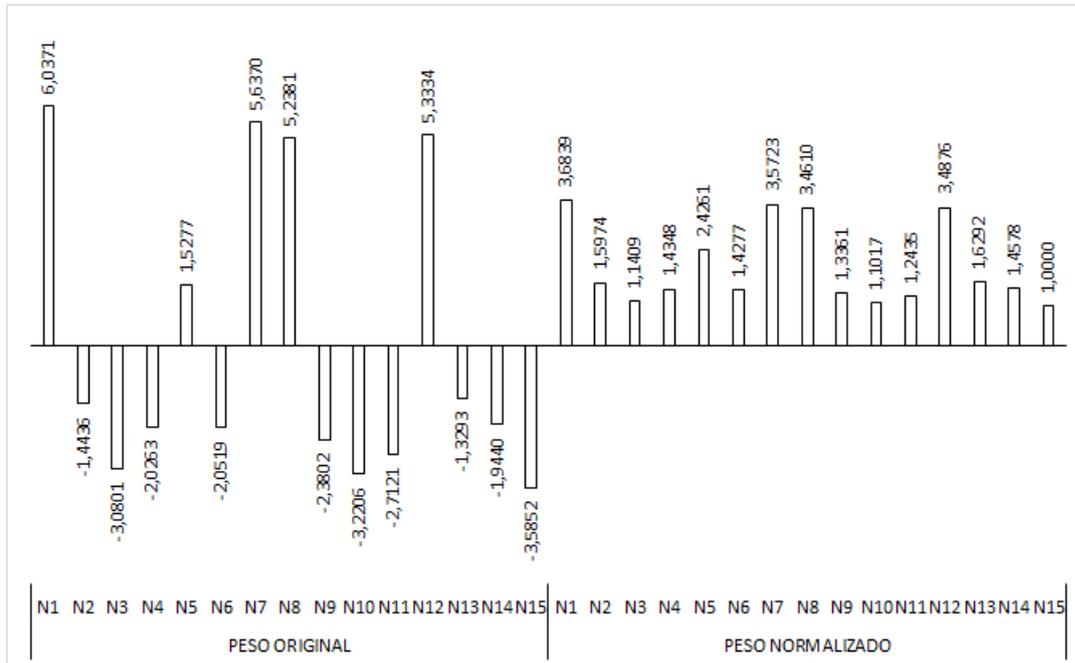
Para viabilizar a algoritmo de roteirização e simplificar a comparação entre critérios, foram eliminados os valores negativos e utilizado como referência (valor 1) a nota de serviço com menor prioridade. O resultado da calibração de prioridades está indicado na tabela 3.5.

**Tabela 3.5.** Lista de serviços e respectivos pesos ponderados

SERVIÇO	PESO PONDERADO
$N_1$	3,6839
$N_2$	1,5974
$N_3$	1,1409
$N_4$	1,4348
$N_5$	2,4261
$N_6$	1,4277
$N_7$	3,5723
$N_8$	3,4610
$N_9$	1,3361
$N_{10}$	1,1017
$N_{11}$	1,2435
$N_{12}$	3,4876
$N_{13}$	1,6292
$N_{14}$	1,4578
$N_{15}$	1,0000

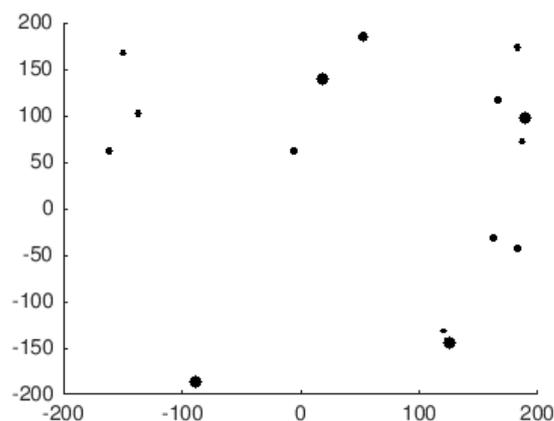
Fonte: Autor

A figura 3.16 indica o processo de ponderação a partir do menor valor para os pesos extraídos do processo decisório PROMETHEE. A ponderação é imperfeita porque há a presença de valores negativos e positivos. Entretanto, como há a manutenção do perfil de prioridade resultante do processo decisório, não há perda de informação de grau de importância relativo de cada um dos serviços.

**Figura 3.16.** Resultado gráfico do processo de ponderação de pesos

Fonte: Autor

A partir da utilização dos métodos decisórios e toda a sequência de simulação de critérios, obtém-se uma relação unificada de pesos e prioridades para notas de serviço de naturezas completamente diferentes que agora podem ser comparadas entre si. A figura 3.17 plota novamente a orientação geográfica de todas as notas de serviço, mas desta vez indicando a prioridade de cada nota como o tamanho de cada ponto no plano cartesiano.

**Figura 3.17.** 15 notas em plano cartesiano com prioridades quantificadas e comparáveis

Fonte: Autor

### 3.3.4 Pesquisa e questionário de priorização com agentes do setor

Conforme já apresentado no método AHP, todos os critérios devem ser comparados e avaliados em pares em escalas de 1 a 9 (Saaty, 1991), onde 1 indica um igual importância entre critérios e 9, dominância total de um critério sobre o outro.

Com o objetivo de organizar os dados e resultados, é elaborada uma matriz de comparação do resultado entre pares. Dado que o resultado da comparação do critério  $a$  com o critério  $b$  deve ser o inverso da comparação do critério  $b$  com o critério  $a$ , a matriz resultante pode ser tida como duas matrizes triangulares, onde para cada elemento  $P_{ij}$  da parte superior existe um transposto  $1/P_{ij}$  na parte inferior. A tabela 3.6 exemplifica a matriz comparativa, onde:

- $C_1$  = Critério quantidade de clientes interrompidos;
- $C_2$  = Critério EUSD total;
- $C_3$  = Critério localização;
- $C_4$  = Critério quantidade de clientes críticos;
- $C_5$  = Critério tempo de atendimento de uma ocorrência emergencial;
- $C_6$  = Critério evento de risco;
- $C_7$  = Critério tempo de vencimento de serviços do Anexo III;
- $P_{ij}$  = Resultado da comparação entre critérios  $i$  e  $j$ .

**Tabela 3.6.** Matriz exemplo de comparação entre critérios

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$C_1$	1	$P_{12}$	$P_{13}$	$P_{14}$	$P_{15}$	$P_{16}$	$P_{17}$
$C_2$	$1/P_{12}$	1	$P_{23}$	$P_{24}$	$P_{25}$	$P_{26}$	$P_{27}$
$C_3$	$1/P_{13}$	$1/P_{23}$	1	$P_{34}$	$P_{35}$	$P_{36}$	$P_{37}$
$C_4$	$1/P_{14}$	$1/P_{24}$	$1/P_{34}$	1	$P_{45}$	$P_{46}$	$P_{47}$
$C_5$	$1/P_{15}$	$1/P_{25}$	$1/P_{35}$	$1/P_{45}$	1	$P_{56}$	$P_{57}$
$C_6$	$1/P_{16}$	$1/P_{26}$	$1/P_{36}$	$1/P_{46}$	$1/P_{56}$	1	$P_{67}$
$C_7$	$1/P_{17}$	$1/P_{27}$	$1/P_{37}$	$1/P_{47}$	$1/P_{57}$	$1/P_{67}$	1

Fonte: Autor

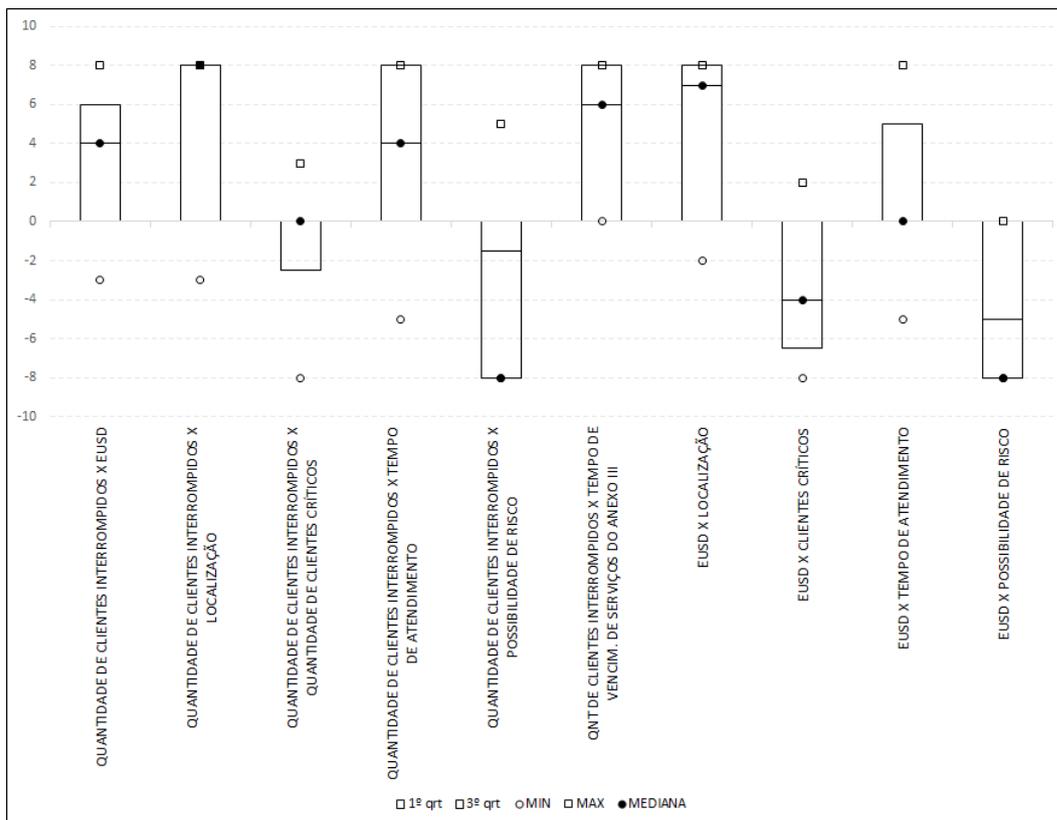
Como parte do projeto de avaliação de critérios, foi enviado um questionário a diversos profissionais do setor com diferentes opiniões e experiências com o tema. Foram envolvidos profissionais da área operacionais, tanto do centro de operação quanto gestores das equipes de campo, da área de gestão de ativos, do setor comercial, entre outros. Esta extensão de pontos de vista permitiu uma avaliação heterogênea de priorizações, o que é ótimo para consolidação de dados. Por exemplo, ainda que provavelmente para um profissional do centro de operação um cliente crítico não seja mais importante que elevadas quantidades de clientes sem energia, talvez esta avaliação seja o inverso para um profissional da área comercial com objetivos e visão de prioridades diferentes.

A pesquisa foi desenvolvida na plataforma *Survey Monkey* e ocorreu de forma totalmente anônima. Não é possível, na coleta final dos dados, identificar quais profissionais responderam à pergunta tampouco quais respostas foram dadas. Somado a isto, foi feita a limitação da escala das respostas em oito graduações, diferindo da escala original do método AHP que é nove. Isto ocorreu por uma restrição da ferramenta de pesquisa e também para simplificar as respostas ao questionário. Para minimizar este impacto, como será explanado à frente, foi realizado um ajuste de consistência das respostas, momento tal que a escala completa de Saaty (1991) foi utilizada.

Os resultados da pesquisa serão utilizados não só para calibrar os critérios em simulações, mas para uma avaliação da percepção de prioridade de cada participante para cada um dos cenários.

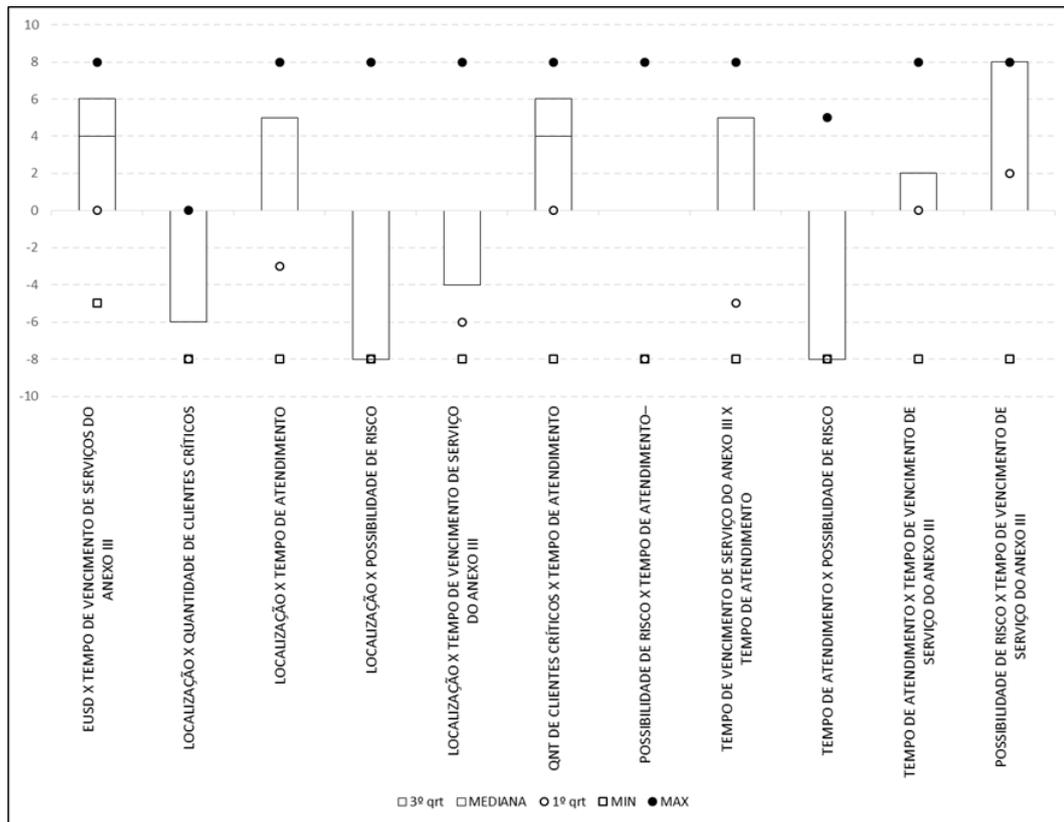
Os resultados estatísticos da pesquisa foram divididos em duas figuras, 3.18 e 3.19, que indicam primeiro e terceiro quartis, mediana, máximo e mínimo. Como os dados coletados não são extensos, em algumas comparações existe a sobreposição de um ou mais pontos.

**Figura 3.18.** Boxplot comparação entre pares de critérios - Parte 1



Fonte: Autor

Figura 3.19. Boxplot comparação entre pares de critérios - Parte 2



Fonte: Autor

Dentre possíveis conclusões dos dados extraídos, é possível por exemplo perceber que o grupo de participantes enxerga com óticas completamente diferentes a priorização de determinados critérios, bem como, em outros comparativos, baixas variabilidades. Os comparativos **Localização X Possibilidade de Risco**, **EUSD X Possibilidade de Risco**, **Tempo de Atendimento X Possibilidade de Risco** são exemplos consensuais entre os participantes. Este comportamento era esperado quando há a comparação de uma possibilidade de risco com atributos mais operacionais, como localização, tempo de vencimento de um serviço comercial ou tempo de atendimento de um serviço emergencial. Nestes casos, qualquer possibilidade de risco é predominante aos demais.

Entretanto, algumas comparações trouxeram à tona a dificuldade consensual em definir o posicionamento crítico entre dois critérios. Tome-se por exemplo os resultados indicados nas tabelas 3.7 e 3.8. Há uma leve tendência a considerar o critério *clientes críticos* menos crítico que o critério *quantidade de clientes interrompidos*. Entretanto, tanto o resultado da mediana da distribuição quanto do terceiro quartil indicam o valor 0, ou seja, que ambos critérios tem a mesma relevância. Em se tratando de clientes críticos, leva-se em conta a possibilidade de não só grandes indústrias mas também hospitais e unidades de UTIs domiciliares estarem sem energia. No outro extremo, tem-se a quantidade de clientes totais interrompidos, que pode abranger toda uma cidade, grandes bairros

comerciais ou residenciais, dentre outros.

O resultado da comparação **Tempo de Vencimento de Serviço do Anexo III X Tempo de Atendimento** também indica uma alta variabilidade subjetiva. As avaliações oscilam entre o primeiro critério, *tempo de vencimento de serviço do Anexo III*, ser totalmente dominante ao segundo, *tempo de atendimento*, até o segundo ser totalmente dominante ao primeiro. Somado a isto, tem-se que a mediana das respostas é 0, que representa uma igual importância entre critérios. Este efeito ocorre porque há uma grande necessidade de rápido atendimento a solicitações reguladas pela ANEEL por parte das distribuidoras de energia, sendo elas solicitações para serviços comerciais ou emergenciais. Naturalmente, serviços emergenciais com alto tempo de fila tem prioridade em relação aos demais serviços comerciais, entretanto, em níveis mais baixos e quando comparados a serviços comerciais que estão próximos do prazo regulado, esta dominância torna-se mais nebulosa.

**Tabela 3.7.** Resultado da comparação - Quantidade de Clientes Interrompidos x Quantidade de Clientes Críticos

<b>QTDE DE CLIENTES INTERROMPIDOS X QTDE DE CLIENTES CRÍTICOS</b>	
MIN	-8
1º QUARTIL	-2,5
MEDIANA	0
3º QUARTIL	0
MÁXIMO	3

Fonte: Autor

**Tabela 3.8.** Resultado da comparação - Tempo de Vencimento de Serviço do Anexo III x Tempo de Atendimento

<b>TEMPO DE VENCIMENTO DE SERVIÇO DO ANEXO III X TEMPO DE ATENDIMENTO</b>	
MIN	-8
1º QUARTIL	-5
MEDIANA	0
3º QUARTIL	5
MÁXIMO	8

Fonte: Autor

A partir dos dados coletados da pesquisa, tem-se uma avaliação de multi percepções. Utilizando a mediana do vetor de respostas para cada uma das avaliações, tem-se

então a atribuição de valores únicos para cada um dos comparativos. Estes valores estão indicados na tabela 3.9.

**Tabela 3.9.** Comparação de critérios resultante da pesquisa

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$C_1$	1	4	8	1	4	1/8	6
$C_2$	1/4	1	7	1/4	1	1/8	4
$C_3$	1/8	1/7	1	1/6	1/5	1/8	1/4
$C_4$	1	4	6	1	4	1/7	8
$C_5$	1/4	1	5	1/4	1	1/8	1
$C_6$	8	8	8	7	8	1	8
$C_7$	1/6	1/4	4	1/8	1	1/8	1

Fonte: Autor

Com os dados adquiridos, foi possível calcular o autovetor e autovetor normalizado da simulação, indicados a seguir na tabela 3.10.

**Tabela 3.10.** Método AHP aplicado a pesquisa com agentes

Critério	Autovetor	Autovetor Normalizado
$C_1$	1,919	0,16
$C_2$	0,805	0,07
$C_3$	0,211	0,02
$C_4$	1,956	0,17
$C_5$	0,629	0,05
$C_6$	5,832	0,50
$C_7$	0,427	0,04

Fonte: Autor

Avaliando os indicadores de consistências, é possível calcular o Índice de Consistência e a Razão de Consistência.

Para a pesquisa, ciente da limitação da escala de Saaty até 8 graduações, o resultado foi:

$$\lambda_{max} = 8,26$$

$$IC = 0,2109$$

$$RC = 0,1598$$

De acordo com Saaty (1991), as graduações de comparação escolhidas tidas como consistentes devem apresentar a Razão de Consistência (RC) abaixo de 0,1. Comparando este valor limite com o obtido nas pesquisas, 0,1598, tem-se que os resultados obtidos são inconsistentes. Este resultado deve-se a alguns fatores:

- Fator 1: Limitação da pesquisa respondida em escala até 8 graduações;
- Fator 2: Como os valores utilizados são frutos de uma análise estatística de respostas diferentes, pode haver uma inconsistência matemática que não é capturada por avaliações numéricas;
- Fator 3: Os respondentes se utilizam das experiências pessoais e emocionais quando da quantificação dos critérios e isso pode gerar inconsistências nas respostas;
- Fator 4: A utilização do método AHP para um número elevado de critérios, neste caso sete, torna o problema mais sensível e conseqüentemente mais suscetível a inconsistências.

Sendo assim, o resultado foi reavaliado e a matriz de comparação foi refeita. O objetivo foi manter a linha de pensamento global obtida no resultado da pesquisa, mas evoluir em termos de consistência de comparações.

O resultado final dos ajustes de consistência está indicado na tabela 3.11 e partir dela obtém-se o índice de consistência e razão de consistência a seguir.

$$\lambda_{max} = 7,42$$

$$IC = 0,0705$$

$$RC = 0,0534$$

O índice de consistência reduziu de 0,1598 para 0,0534. O problema se tornou consistente e todo o perfil de respostas obtido da pesquisa foi mantido.

**Tabela 3.11.** Ajuste de consistência resultante da pesquisa

	$C_1$	$C_2$	$C_3$	$C_4$	$C_5$	$C_6$	$C_7$
$C_1$	1	3	6	2	5	1/4	6
$C_2$	1/3	1	3	1/3	3	1/6	4
$C_3$	1/6	1/3	1	1/4	1/2	1/9	1
$C_4$	1/2	3	4	1	3	1/5	5
$C_5$	1/5	1/3	2	1/3	1	1/8	3
$C_6$	4	6	9	5	8	1	9
$C_7$	1/6	1/4	1	1/5	1/3	1/9	1

Fonte: Autor

O resultado do método AHP para o resultado comparativo da tabela 3.11 é dado pela indicação do autovetor e autovetor normalizado na tabela 3.12.

**Tabela 3.12.** Resultado do método AHP após ajustes de consistência

Critério	Autovetor	Autovetor Normalizado
$C_1$	2,225	0,20
$C_2$	0,944	0,09
$C_3$	0,359	0,03
$C_4$	1,511	0,14
$C_5$	0,557	0,05
$C_6$	4,997	0,46
$C_7$	0,315	0,03

Fonte: Autor

### 3.3.5 Aplicação de Busca Tabu para minimização do custo global

#### 3.3.5.1 Implementação na modelagem computacional

Primeiramente, serão tratadas as alterações em relação ao modelo computacional desenvolvido. Para representar o novo cenário de avaliação do custo global, foi desenvolvido um gerador aleatório de atributos para cada nota de serviço simulada. O objetivo é que o gerador de atributos represente o mais fielmente a distribuição de serviços de uma distribuidora de energia elétrica.

Um exemplo da caracterização dos serviços é: dada a topologia atual das redes de distribuição e seus equipamentos, uma parcela muito significativa das ocorrências emergenciais acontece afetando somente um cliente, denominadas ocorrências isoladas. O segundo grupo de ocorrências mais frequente afeta transformadores de distribuição ou redes de baixa tensão. Ocorrências deste grupo afetam entre 2 a 50 clientes. Subsequentemente, encontram-se ocorrências em dispositivos responsáveis por manter a energização de vários grupos transformadores e esta sequência se segue até a ocorrência mais impactante de uma rede de distribuição que é o desligamento de todo um circuito alimentador de distribuição.

A tabela abaixo indica a faixa escolhida máxima para cada um dos critérios. Ressalta-se conforme explicado anteriormente, os valores determinados para cada nota de serviço não são completamente aleatórios para cada atributo, mas seguem um perfil real de aleatoriedade.

**Tabela 3.13.** Faixa de valores dos critérios para modelagem

Atributo	Faixa de valores
Qtde de Clientes	0 (se comercial) a 1000
EUSD Total	10 a 500 x Qtde Clientes
Localização	0 ou 1 (binário)
Clientes Críticos	0 a 10% dos clientes
Tempo de Atendimento Emergencial	0 a 24 horas
Possibilidade de Risco	0 ou 1 (binário)
Tempo de vencimento de serviço do Anexo III	0 a 12 horas

Fonte: Autor

### 3.3.5.2 Desenvolvimento da meta-heurística

Neste segundo modelo, foi implementada a Busca Tabu para minimização da função objetivo. Dentre heurísticas e meta-heurísticas disponíveis, esta foi escolhida porque se trata de um problema de médio custo computacional e porque é possível direcionar uma expectativa de melhor solução para a função objetivo.

A função objetivo deste segundo modelo, apresentada anteriormente, é recapitulada pela equação 3.15.

$$Min f(x)_2 = \sum_{v=1}^{qv} \sum_{n=1}^{qn} T(n-1, n) \times P_n \quad (3.15)$$

Onde:

$v$  = variável viatura;

$qv$  = quantidade de viaturas disponíveis;

$n$  = nota de serviço a ser executada;

$qn$  = quantidade de notas de serviços a serem executadas;

$T$  = matriz tempo entre notas de serviço;

$P$  = matriz prioridade definida para cada nota de serviço.

Diferentemente do primeiro modelo, o objetivo agora não se trata somente da otimização de distâncias, mas do custo global que é função do tempo e da criticidade de cada serviço.

Assim como no modelo inicial, há a configuração da matriz  $D$ , calculada indicando as distâncias entre pares de serviços. A matriz está indicada na equação 3.16.

$$D = \begin{bmatrix} d_{11} & \dots & d_{1n} \\ d_{21} & \dots & d_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ d_{n1} & \dots & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (3.16)$$

Porém, diferentemente da utilização da matriz no primeiro modelo, os elementos presentes na diagonal da matriz agora têm importância fundamental. Estes elementos são responsáveis por caracterizar o tempo de execução de cada serviço, determinando assim, o fator fila de execução de serviços.

O algoritmo desenvolvido neste modelo implementa a utilização da Busca Tabu para cada quadrante de divisão entre veículos. Isto acontece porque, assim como no primeiro modelo, há a aplicação da heurística de Gillet e Miller (1974) para separação de quadrantes e das iterações de trocas angulares entre pontos. A sequência de iterações é: divisão entre *clusters* angulares, aplicação da meta-heurística de Busca Tabu, realização do próximo giro angular. A repetição do processo se dá até durante um período completo de trocas de pontos, assim como no modelo 1. O algoritmo está indicado de forma resumida a seguir.

---

**Algorithm 5** Pseudocódigo do algoritmo do Modelo #2: Gillet e Miller / Busca Tabu

---

```

1: Inicializa matriz  $D$ ;
2: Inicia contador de interações de giro polar ( $c$ );
3: for  $c = c_1 \leftarrow It_{max}$ , número máximo de giros inéditos do
4:   Realiza divisão das notas de serviços em respectivos clusters;
5:   Inicializa seleção do cluster  $q$ ;
6:   for  $q = q_1 \leftarrow q_n$  do, visitando todos os clusters;
7:     Ordena  $P_i$ , matriz de pesos, do maior para menor e seleciona  $n_1$  e  $p_1$ ;
8:     for Nota de serviço  $n_i \leftarrow n_n \in q$  do
9:       Seleciona nota de serviço  $n_i + 1$ ;
10:      Realiza troca  $n_i$  por  $n_{i+1}$ ;
11:      if Verifica se a troca está na Lista Tabu then
12:        Busca próxima nota;
13:      else
14:        if Avalia se  $F(x_i) < F(x_{min})$  then
15:          Inclui movimento na Lista Tabu
16:          Armazena menor valor de função objetivo e configuração;
17:        end if
18:        Atribui nota  $n_{i+1}$  na rota do cluster  $q$ ;
19:      end if
20:    end for
21:  end for
22: end for

```

---

### 3.3.5.3 Lógica computacional e Lista Tabu

Dada a relevância do aspecto dos pesos na montagem da solução, como solução original, a matriz sequência de execução,  $NS$ , é resultado da ordenação do maior peso para o menor. Esta configuração orienta o algoritmo a buscar os maiores pesos primeiro, independente de ganhos de rota ou logística.

Para montagem das soluções subsequentes, o próximo elemento da matriz ordenada de pesos é trocado pelo anterior. Efetuada a troca, é avaliado o valor da função objetivo e alimentado a Lista Tabu com os movimentos proibidos, independente se houve melhora na função objetivo ou não. Esta definição foi implantada porque uma vez feito o movimento, fazê-lo novamente na mesma configuração de *clusters* não traz qualquer novidade em termos de soluções inéditas.

A Lista Tabu é estruturada em formato de matriz quadrada  $n \times n$ , sendo  $n$  a relação de serviços disponíveis para atendimento. O modelo está indicado na equação 3.17.

$$Lista\ Tabu = \begin{bmatrix} 1 & \dots & t_{1n} \\ t_{21} & \dots & t_{2n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ t_{n1} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3.17)$$

A matriz é preenchida indicando o número da iteração na qual foi realizada, conforme estrutura de memória da lista. Nesta regra, excetuam-se apenas os elementos da diagonal da matriz. A sequência de equações a seguir (começando pela equação 3.18) indica um exemplo de utilização da matriz para um problema com cinco notas disponíveis.

$$Lista\ Tabu = \begin{bmatrix} 1 & t_{12} & t_{13} & t_{14} & t_{15} \\ t_{21} & 1 & t_{23} & t_{24} & t_{25} \\ t_{31} & t_{32} & 1 & t_{34} & t_{35} \\ t_{41} & t_{42} & t_{43} & 1 & t_{45} \\ t_{51} & t_{52} & t_{53} & t_{54} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.18)$$

Neste exemplo, tem-se que o serviço com maior peso é o indicado como 2, o segundo com maior peso o serviço 5 e o terceiro, o serviço 3. As equações 3.19 e 3.20 indicam o resultado da Lista Tabu, respectivamente, após as duas movimentações citadas no primeiro ciclo de iterações.

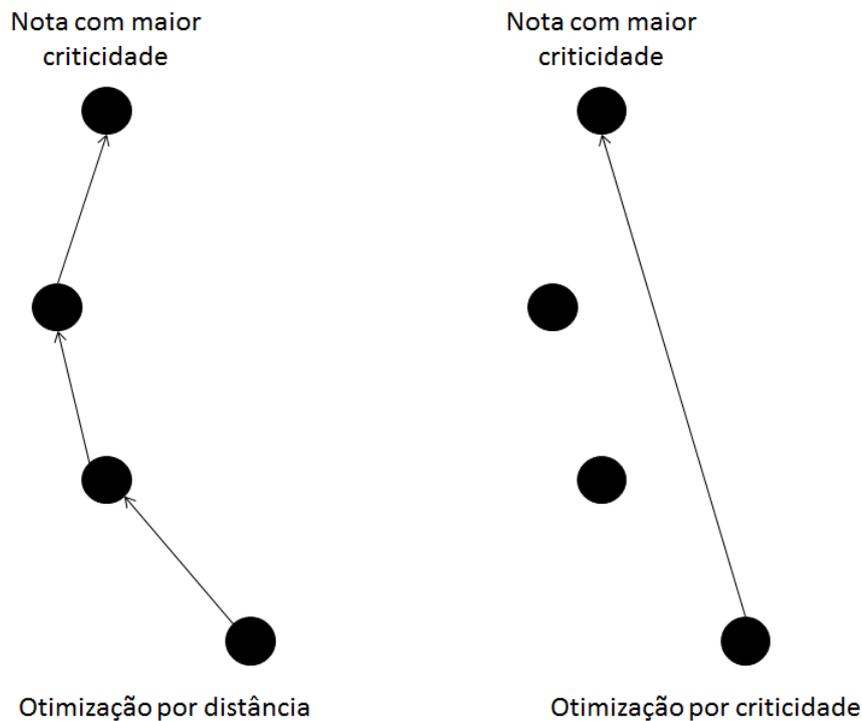
$$Lista\ Tabu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

$$Lista\ Tabu = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.20)$$

A estrutura de memória da lista é reiniciada a cada movimento de intercâmbio de serviços entre *clusters* ou, como definido anteriormente, a cada *giro polar*. Neste momento, a Lista Tabu inicia a recontagem.

Outro efeito verificado de alto impacto na construção da melhor solução é o tempo de execução de cada serviço, que gera o tempo de fila. Considerando que a utilização do algoritmo de Gillet e Miller (1974) para distribuição dos serviços já predispõe um perfil radial de divisão entre *clusters*, o tempo de execução nulo implica numa otimização muito próxima da otimização por distância. No exemplo da figura 3.20, percebe-se que tanto a rota otimizada por distância quando a por peso praticamente resultam na mesma distância/tempo percorrido até a inclusão da nota de serviço de maior peso na sequência. Este cenário só ganha novos contornos com a consideração dos tempos de execução para cada serviço no algoritmo. Desta forma, a fila de execução causada pela priorização de outros serviços tem impacto direto no tempo despendido até a execução do serviço prioritário.

**Figura 3.20.** Exemplo comparação algoritmos de otimização de distância e otimização por criticidade das notas de serviço



Fonte: Autor

Para exemplificar, será simulado um exemplo de 40 notas para despacho de quatro veículos, considerando três cenários de tempo de execução: 0, 50, 100 e 150. O objetivo neste momento não é abordar o maior número de possibilidades de combinações de tempos de execução, mas sim verificar a resposta do sistema a diferentes perfis. Por este motivo, foram escolhidas quatro faixas de tempo de execução e todos os serviços com o mesmo tempo. Na prática, a realização de tempos iguais por serviço não acontece, mas no ambiente de simulação foi necessária esta definição para uma avaliação blindada do efeito da variação dos tempos de execução.

Para otimização do modelo 2, foram utilizados os pesos para cada critério determinados a partir do resultado da pesquisa com agentes. Os pesos para cada critério estão indicados a seguir.

**Tabela 3.14.** Pesos para critérios utilizados na simulação

Critério	Autovetor	Autovetor Normalizado
$C_1$	2,225	0,20
$C_2$	0,944	0,09
$C_3$	0,359	0,03
$C_4$	1,511	0,14
$C_5$	0,557	0,05
$C_6$	4,997	0,46
$C_7$	0,315	0,03

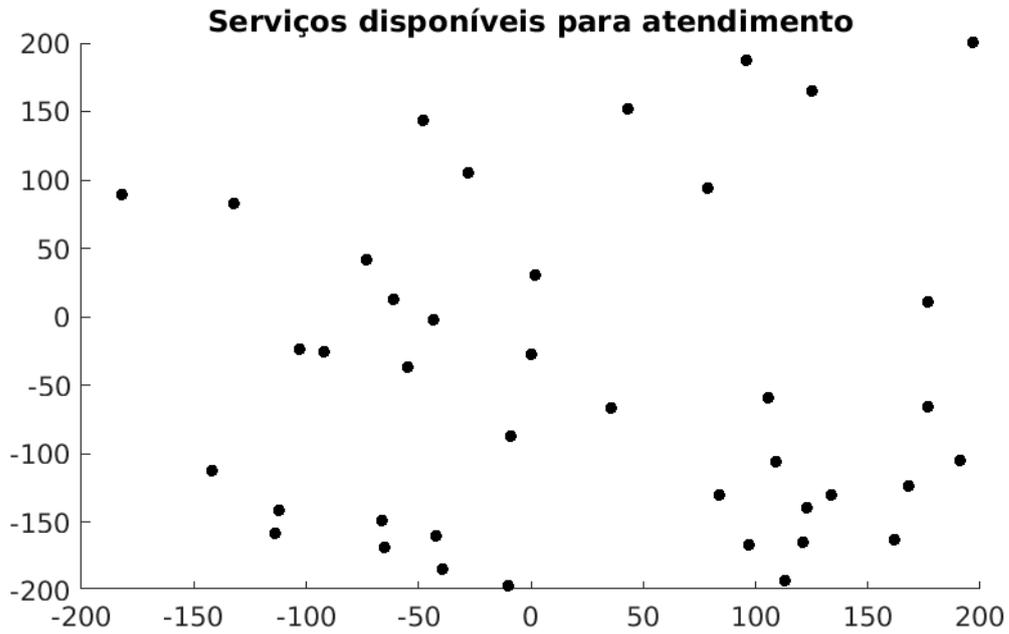
Fonte: Autor

A simulação indicada está representada na figura 3.21. Serão 40 serviços a serem distribuídos para 4 diferentes equipes. Neste primeiro bloco de simulações, o tempo de execução considerado é zero para todos os serviços.

Os resultados do algoritmo de otimização estão indicados nas figuras 3.22, 3.23 e 3.24. A figura 3.22 indica a evolução do valor da função objetivo ao longo das iterações e também da incumbente. Percebe-se os saltos de valor a cada grupo de iterações, reflexo dos giros angulares, que são os movimentos nos quais ocorrem os intercâmbios de notas entre grupos (agrupamento de giros está indicado na figura 3.23). A partir de então, o processo de busca se reinicia porque há uma nova configuração de atendimento (inclusive a Lista Tabu é reiniciada). Neste exemplo, o primeiro grupo de iterações guarda o menor valor dentre os demais, atingida na iteração 166.

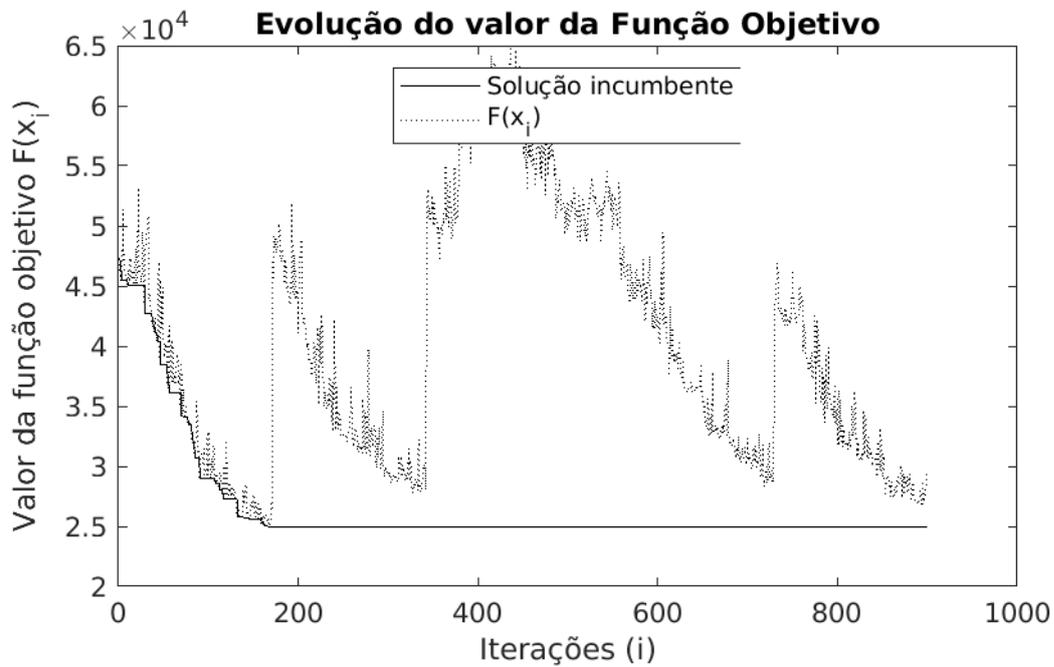
É importante também ressaltar o perfil da melhor configuração de despacho: a figura 3.24 representa a melhor configuração. Nela percebe-se uma tendência das rotas a otimizar distância e o efeito dos pesos é bem pequeno quando comparado ao ganho logístico.

**Figura 3.21.** Representação de 40 notas de serviço para simulação



Fonte: Autor

**Figura 3.22.** Simulação com 40 notas e 4 equipes: evolução da função objetivo e da incumbente



Fonte: Autor





## 4 RESULTADOS

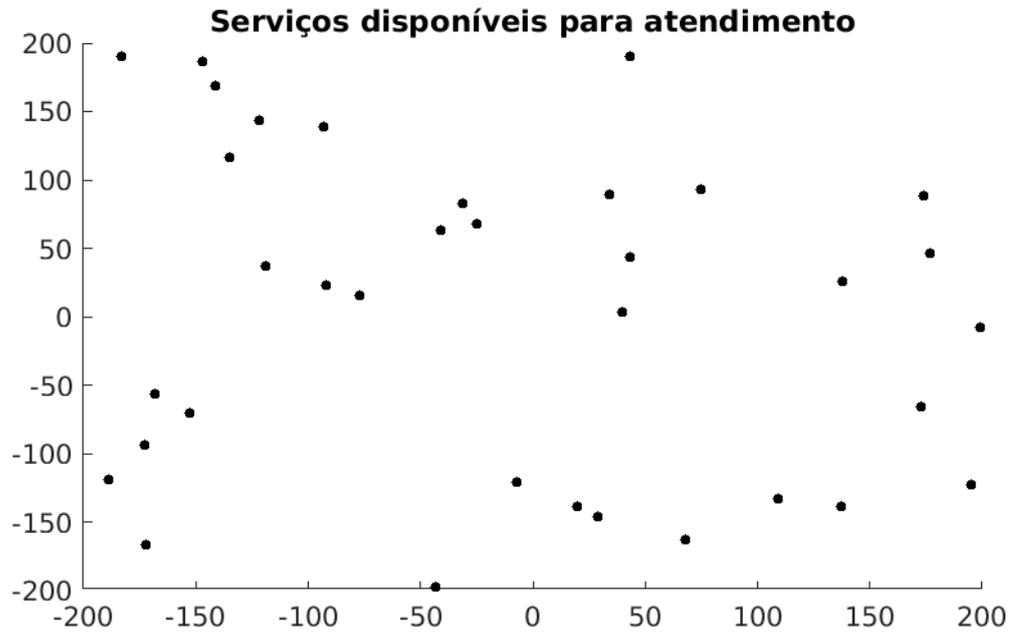
### 4.1 Resultados de simulações do Modelo #1

Para validar o método proposto, foram simulados mais dois exemplos de cenários de despacho: o primeiro com 35 notas de serviço e 5 veículos e outro com 60 notas de serviço e 6 veículos. O objetivo desta combinação é variar tanto o volume total de notas disponíveis para atendimento quanto a relação quantidade de nota por veículo e avaliar o desempenho tanto do algoritmo quanto a variação da função objetivo.

No primeiro exemplo, o ciclo inédito de giros é composto por 7 iterações. Com a disposição aleatória de notas definida, obteve-se o melhor valor da função objetivo, 1629 já na terceira iteração. Entretanto, até o ciclo completo da função, obteve-se também um valor máximo de 2026, quase 25% superior.

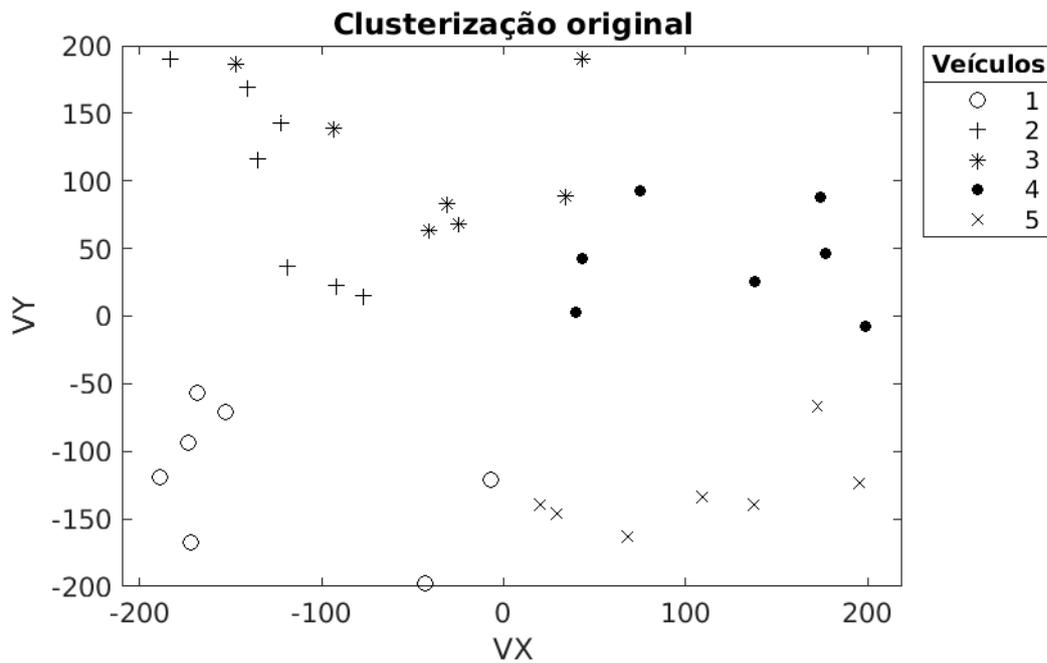
O segundo exemplo tem um comportamento diferente. Como foram escolhidas 60 notas para 6 carros, o resultado do algoritmo roteará 10 notas por veículo, o que implica em um número igual de iterações por ciclo. Contrariamente ao exemplo anterior, neste o melhor valor da função objetivo encontra-se somente na última iteração do ciclo, 2433. Quando comparado ao maior valor do ciclo, 2866, obteve um ganho total de cerca de 17% no valor da função objetivo. Visualmente, é perceptível que os modelos se aproximam de rotas que buscam a menor distância percorrida, mas à medida que se aumenta a relação nota de serviço por equipe, o resultado do modelo se apresenta menos aderente. Isto acontece porque ainda que a heurística de busca do vizinho local seja de baixa complexidade, os resultados se deterioram quando o número possível de possibilidades de solução aumenta. Entretanto, ainda assim indica um mínimo local da função.

**Figura 4.1.** Representação de 35 notas de serviço para simulação



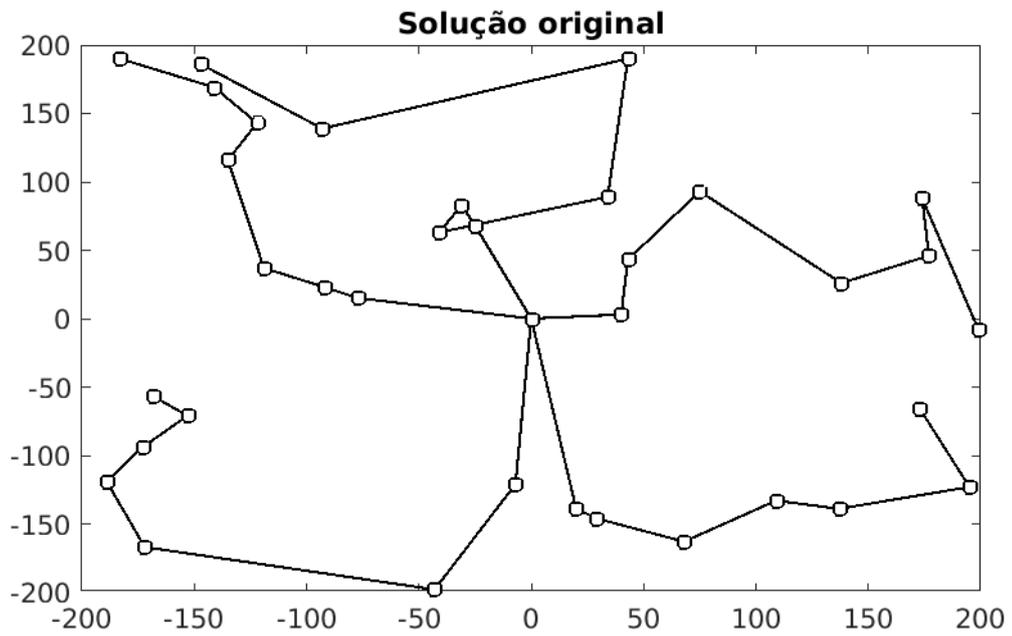
Fonte: Autor

**Figura 4.2.** Exemplo 35 notas / 5 veículos. Divisão inicial em *clusters* para atendimento



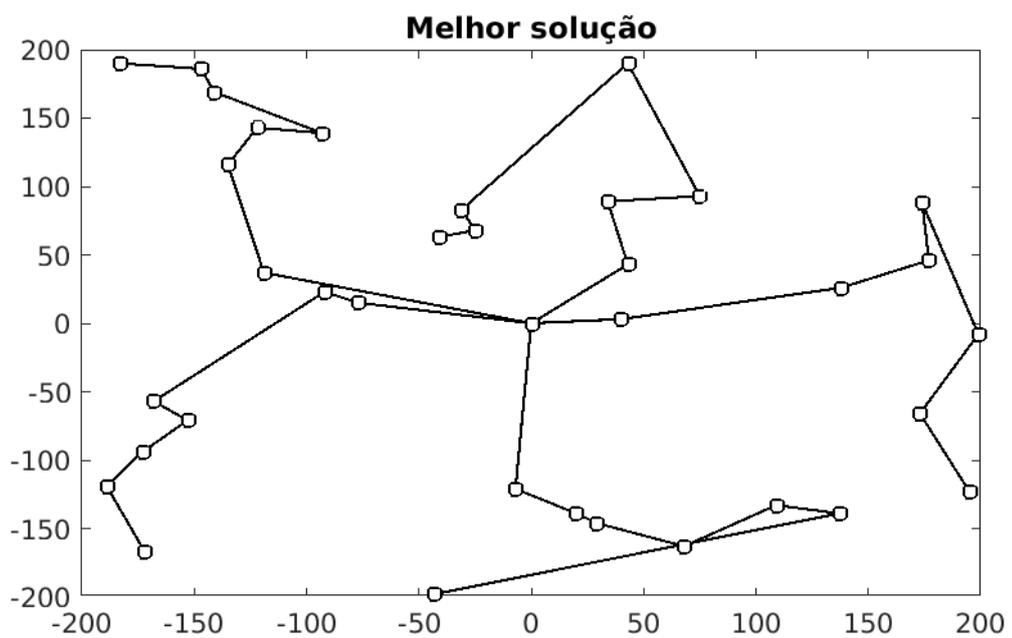
Fonte: Autor

**Figura 4.3.** Simulação 35 notas: Solução original do problema



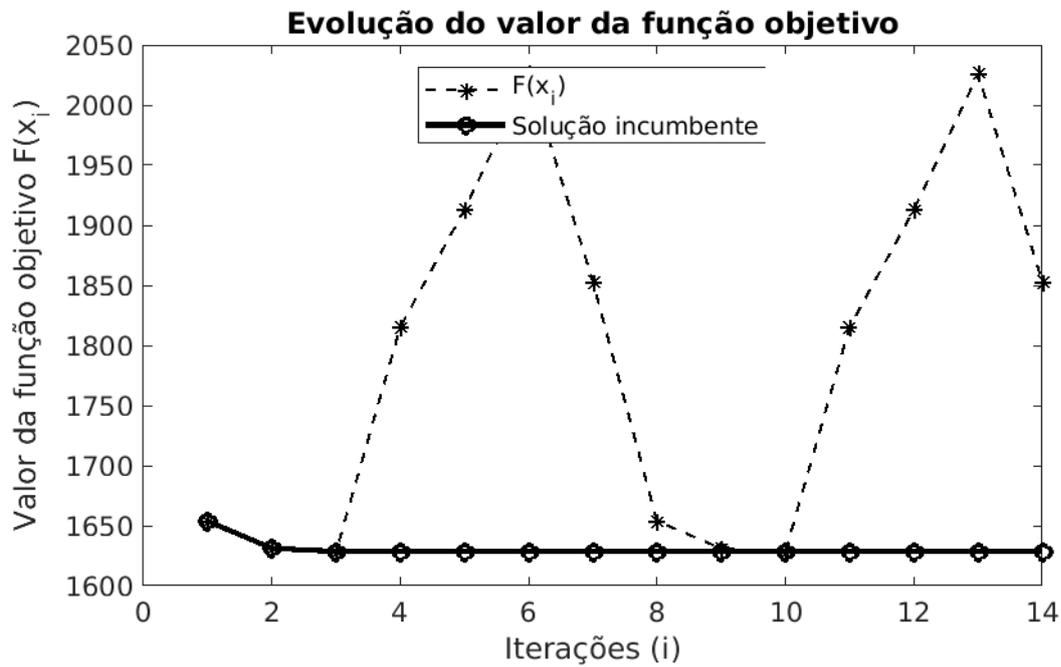
Fonte: Autor

**Figura 4.4.** Simulação 35 notas: Melhor solução do problema



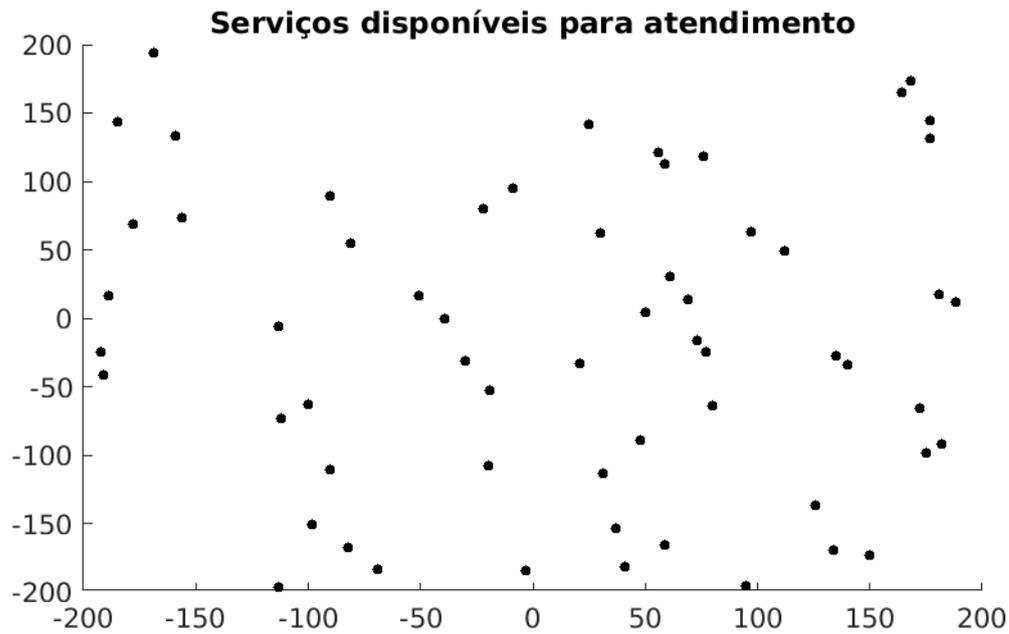
Fonte: Autor

**Figura 4.5.** Simulação 35 notas: Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração



Fonte: Autor

**Figura 4.6.** Representação de 60 notas de serviço para simulação



Fonte: Autor

Figura 4.7. Simulação 60 notas: Divisão inicial em *clusters* para atendimento

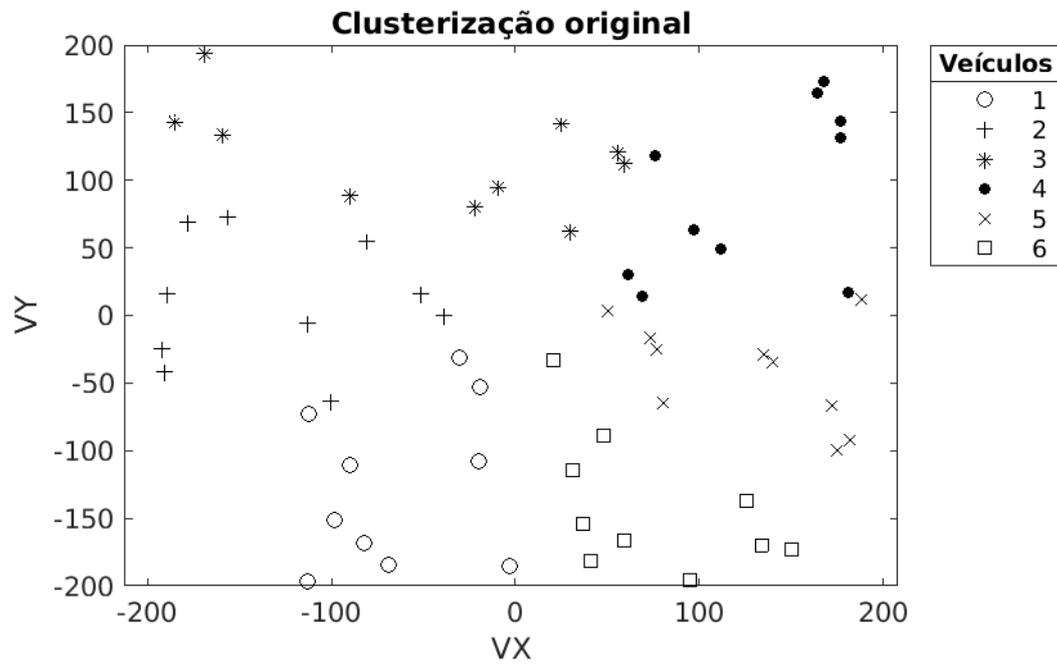
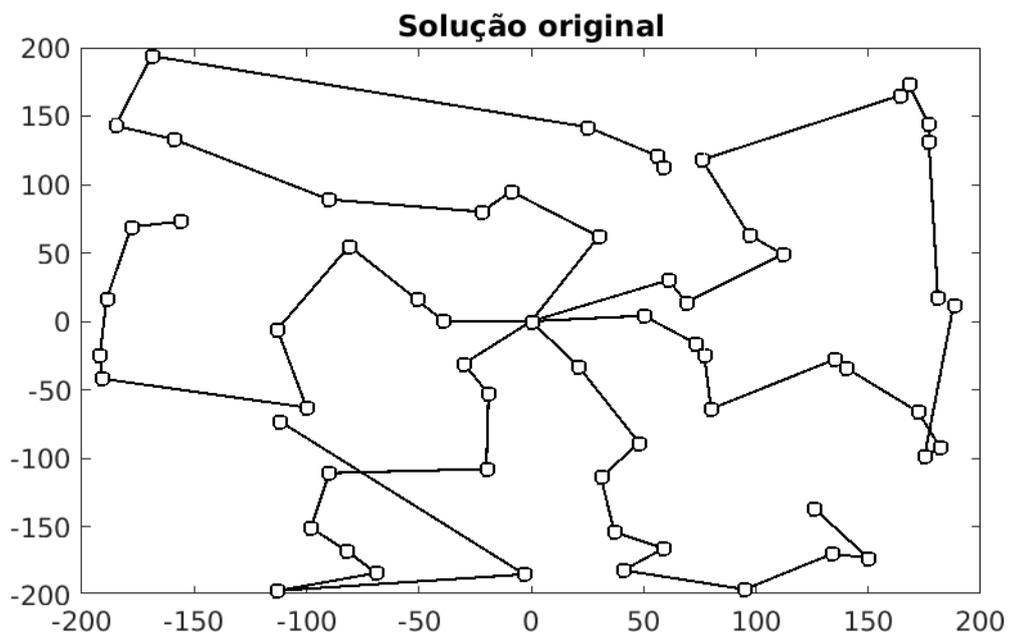
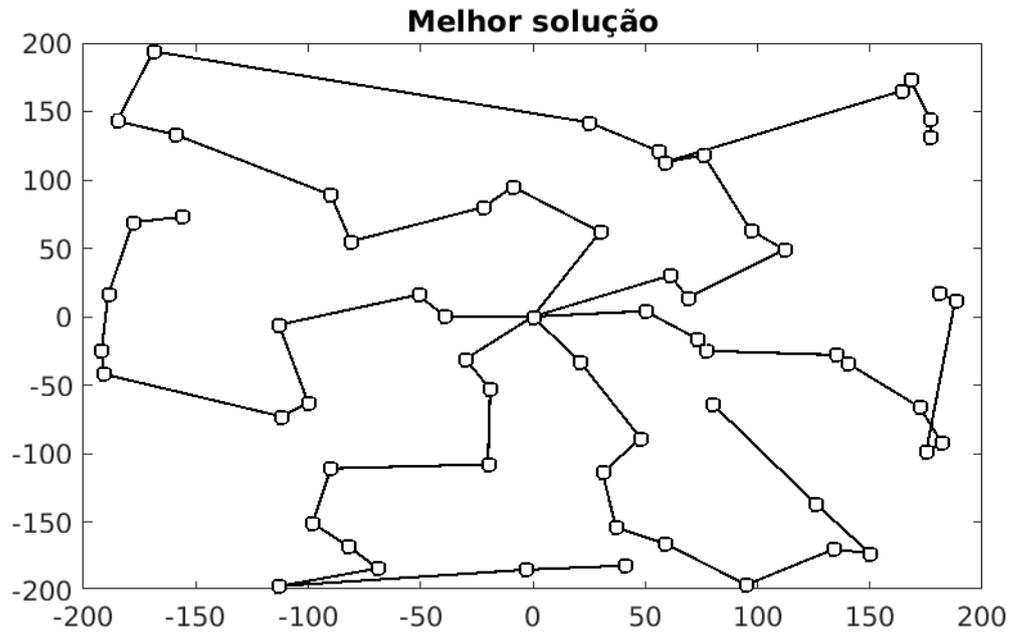


Figura 4.8. Simulação 60 notas: representação da solução original

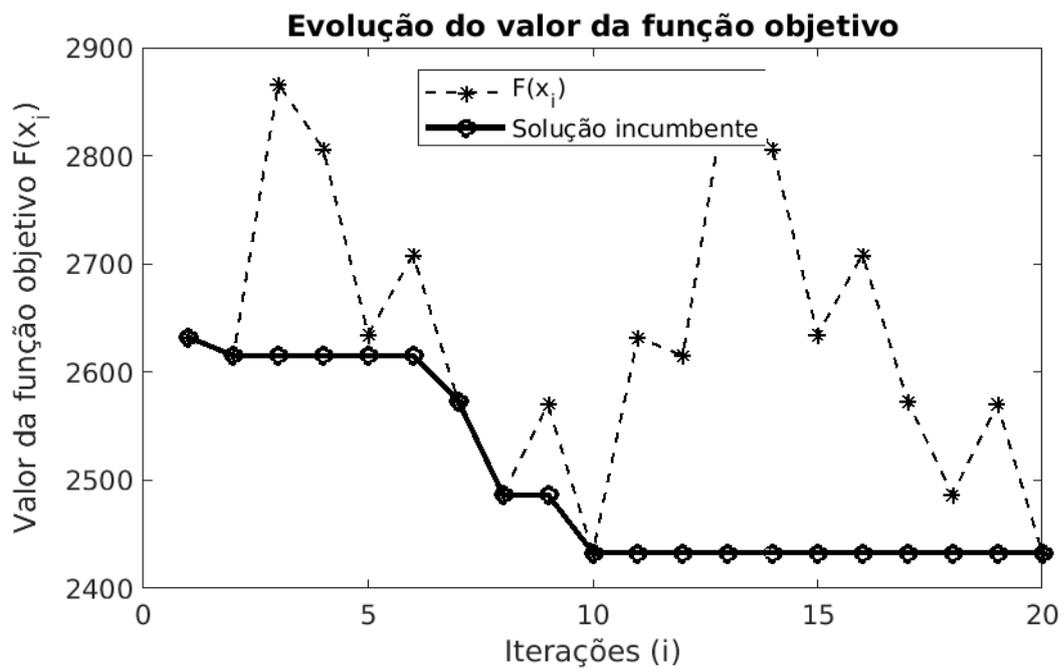


**Figura 4.9.** Simulação 60 notas: representação da melhor solução



Fonte: Autor

**Figura 4.10.** Simulação 60 notas: Evolução da função objetivo e da incumbente por dois ciclos completos de iteração



Fonte: Autor

## 4.2 Resultados de simulações do Modelo #2

Foram realizadas simulações associadas ao segundo modelo para a mesma disposição de notas de serviço do modelo anterior, agora incluindo para avaliação a matriz de critérios e respectivos valores. Foram realizadas simulações para cenários com 35 e 60 notas de serviço, com 5 e 6 veículos respectivamente.

Um efeito muito importante já citado é o efeito do valor do tempo de execução na fila de serviços e o impacto nos resultados finais. Para cada simulação, foram utilizados tempos padrões de 0, 250 e 150 minutos.

Além disto, a matriz de pesos utilizada foi a resultante da pesquisa junto aos agentes já com ajustes de consistência. A matriz está indicada na tabela 4.1.

**Tabela 4.1.** Resultado do método AHP após ajustes de consistência

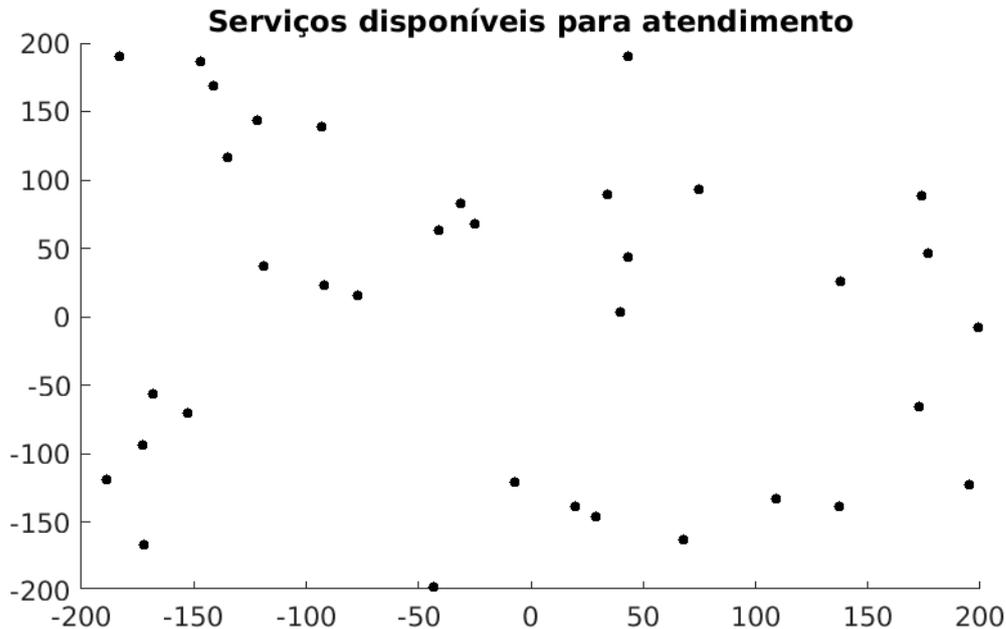
Critério	Autovetor	Autovetor Normalizado
$C_1$	2,225	0,20
$C_2$	0,944	0,09
$C_3$	0,359	0,03
$C_4$	1,511	0,14
$C_5$	0,557	0,05
$C_6$	4,997	0,46
$C_7$	0,315	0,03

Fonte: Autor

### 4.2.1 Simulação 35 notas de serviço

A simulação de 35 notas de serviço é apresentada na figura 4.11. Estas notas serão divididas entre 5 diferentes veículos e todas foram preenchidas através do algoritmo de geração de valores para atributos resumido na tabela 3.13.

**Figura 4.11.** Representação de 35 notas de serviço para simulação



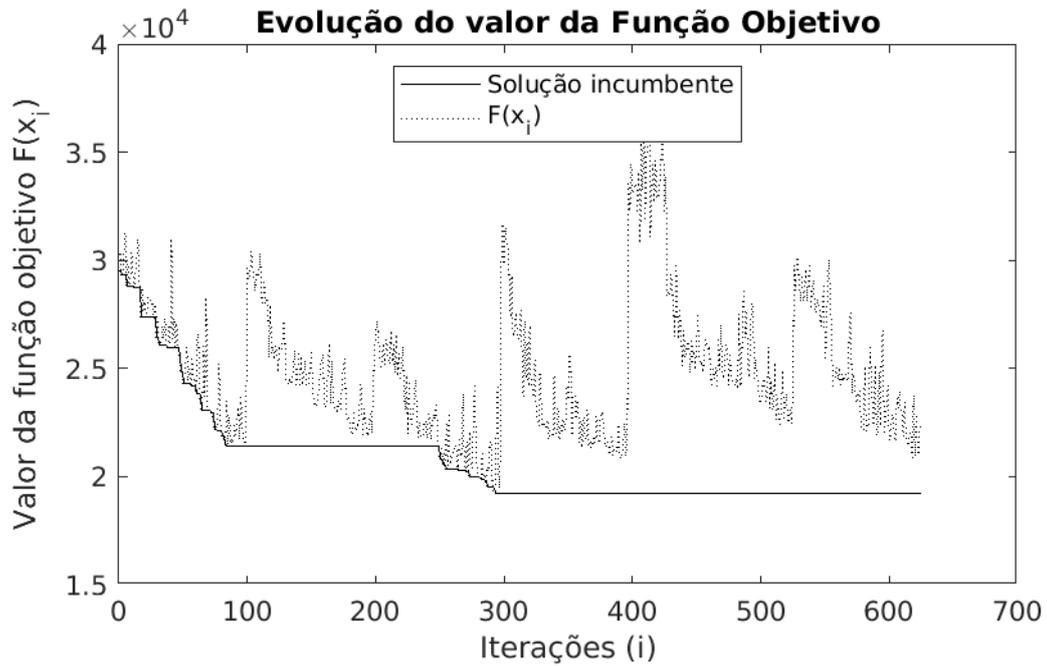
Fonte: Autor

Os resultados indicados nas figuras subsequentes indicam o resultado das simulações com a variação dos tempos de execução para os serviços, representados por  $D_{ii}$ . As figuras 4.12 e 4.13 indicam o resultado do processo de simulação com  $D_{ii} = 0$ , as figuras 4.14 e 4.15 o resultado com  $D_{ii} = 250$  e, por fim, as figuras 4.16 e 4.17 o resultado com  $D_{ii} = 500$ . Respectivamente, a primeira e segunda figura de cada grupo indicam a evolução da função objetivo ao longo das iterações e o resultado final do processo iterativo.

Aspectos importantes do resultado das simulações devem ser considerados. O primeiro diz respeito à evolução das função objetivo. O acréscimo dos valores de execução faz com que o melhor valor da função objetivo saia de  $F(x) = 19K$  para  $F(x) = 80K$  na segunda rodada e saltando para  $F(x) = 133K$  na terceira. Estes saltos elevados são resultado do impacto do tempo de fila no valor final do processo.

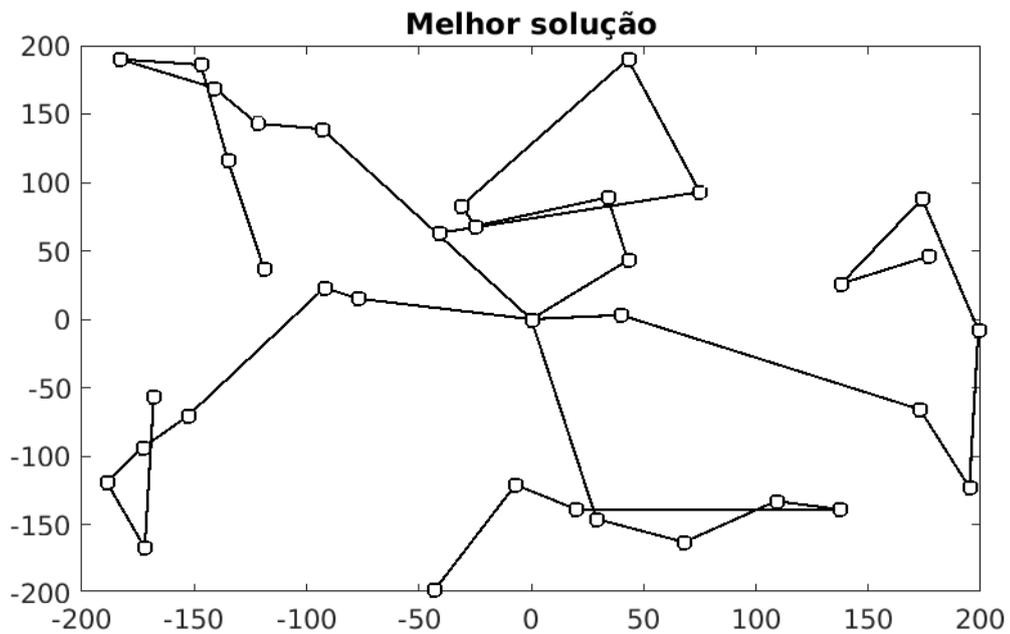
Outro aspecto muito relevante é o perfil do resultado das melhores soluções. A melhor solução para o processo com tempo de execução nulo se assemelha bastante a uma otimização por distância. Entretanto, à medida que os valores de  $D_{ii}$  evoluem, os valores dos pesos das notas de serviço ganham mais relevância e o algoritmo passa a roteirizar menos pela distância e mais pelos pesos.

**Figura 4.12.** Simulação 35 notas com  $Dii = 0$ : evolução da função objetivo e da incumbente



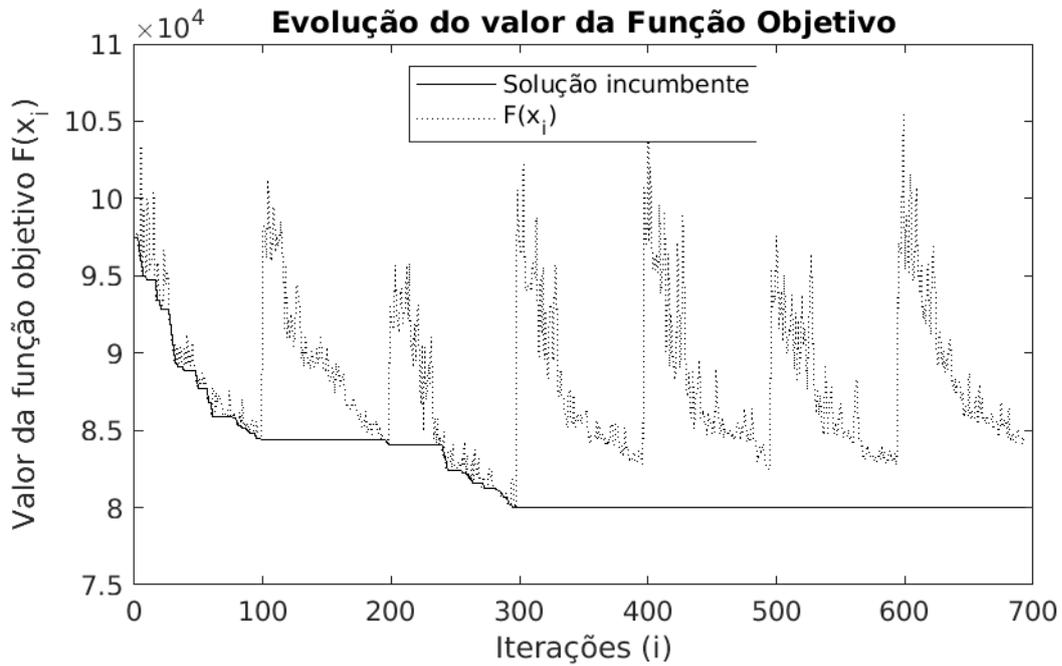
Fonte: Autor

**Figura 4.13.** Simulação 35 notas com  $Dii = 0$ : representação da melhor solução



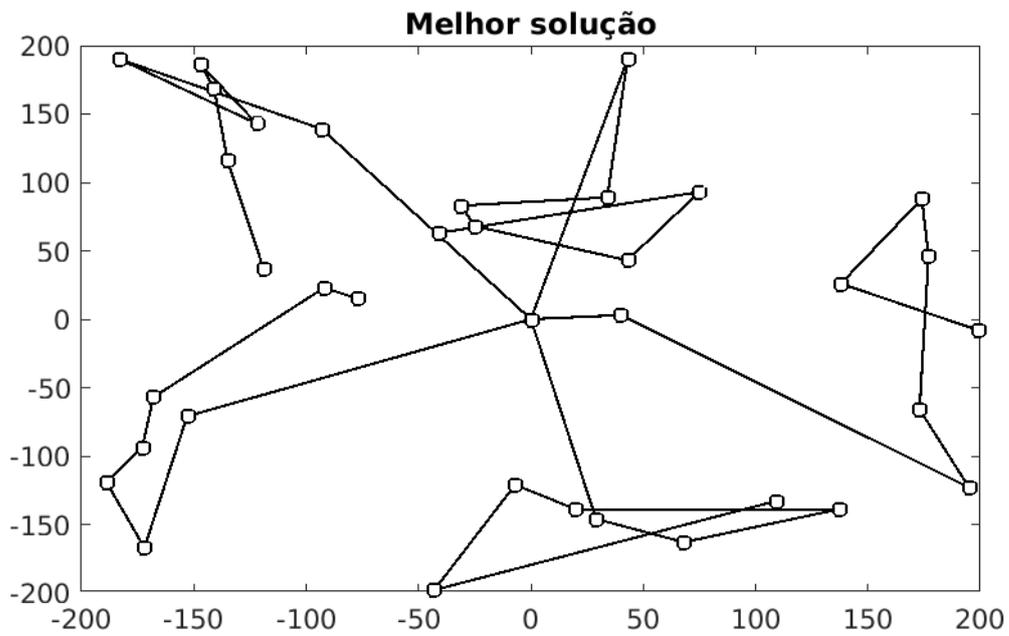
Fonte: Autor

**Figura 4.14.** Simulação 35 notas com  $D_{ii} = 250$ : evolução da função objetivo e da incumbente



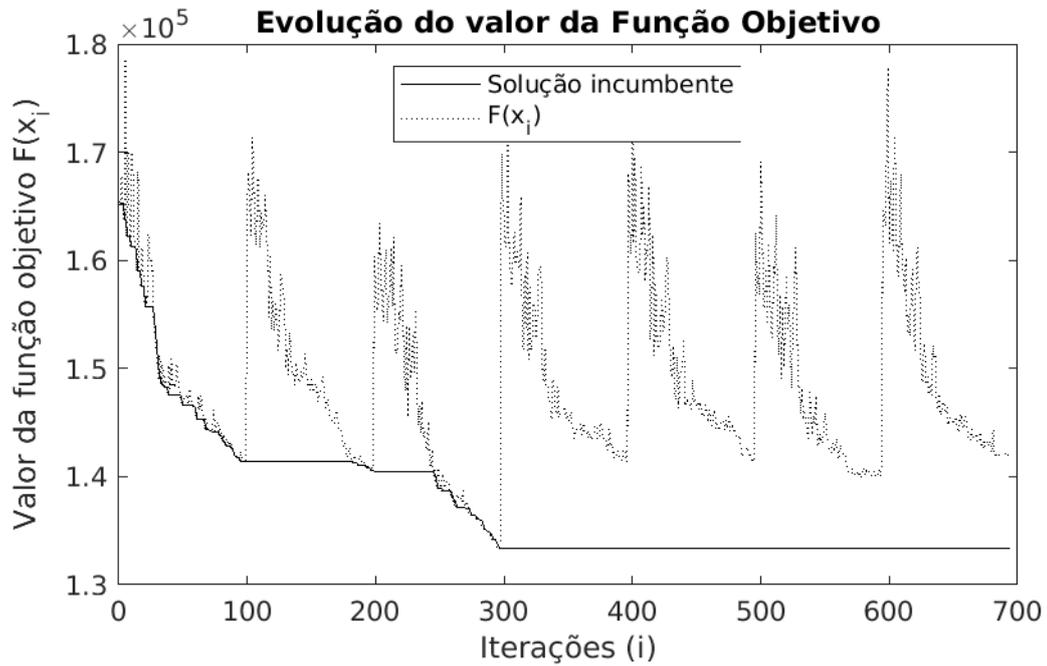
Fonte: Autor

**Figura 4.15.** Simulação 35 notas com  $D_{ii} = 250$ : representação da melhor solução



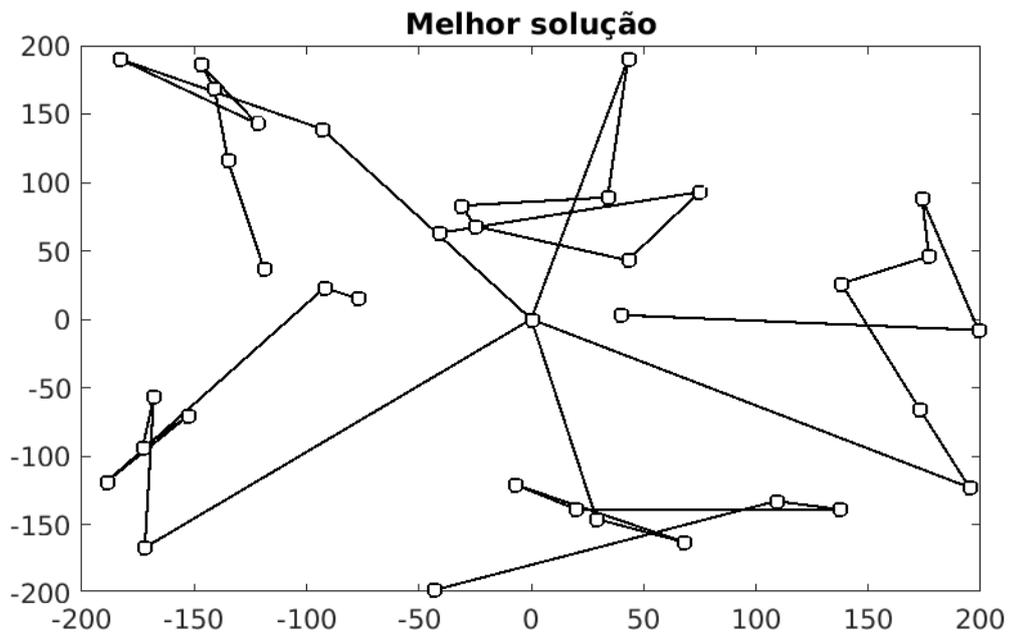
Fonte: Autor

**Figura 4.16.** Simulação 35 notas com  $Dii = 500$ : evolução da função objetivo e da incumbente



Fonte: Autor

**Figura 4.17.** Simulação 35 notas com  $Dii = 500$ : representação da melhor solução

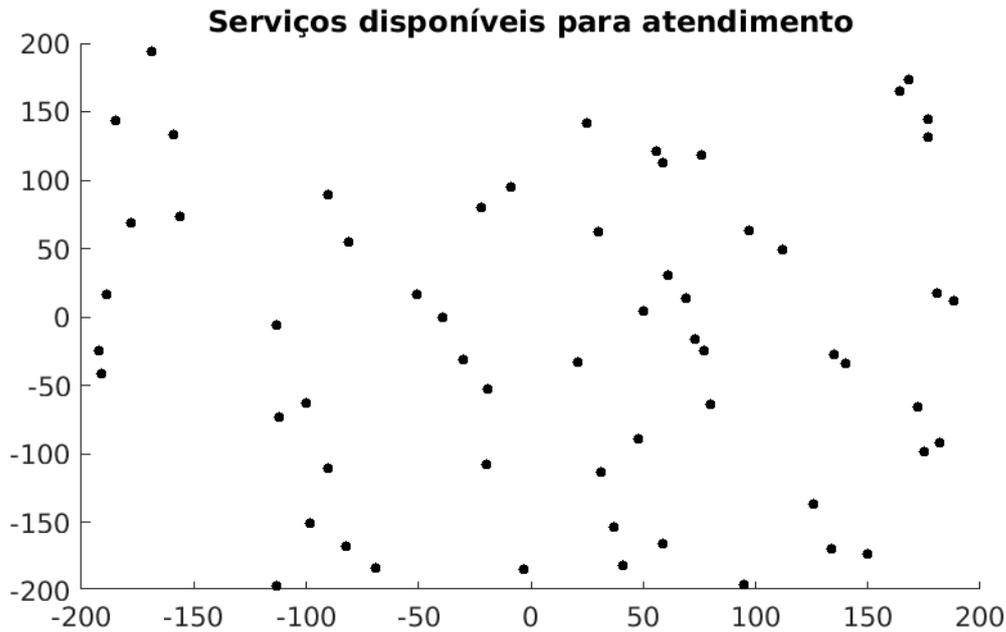


Fonte: Autor

#### 4.2.2 Simulação 60 notas de serviço

A simulação envolvendo 60 notas de serviço e 6 veículos segue uma lógica idêntica à anterior: é exatamente a distribuição de notas utilizada no algoritmo de otimização de distâncias. A diferença é a inclusão dos 7 critérios e respectivos pesos para cada nota de serviço, que são os mesmos estabelecidos na simulação com 35 notas de serviço.

**Figura 4.18.** Representação de 60 notas de serviço para simulação

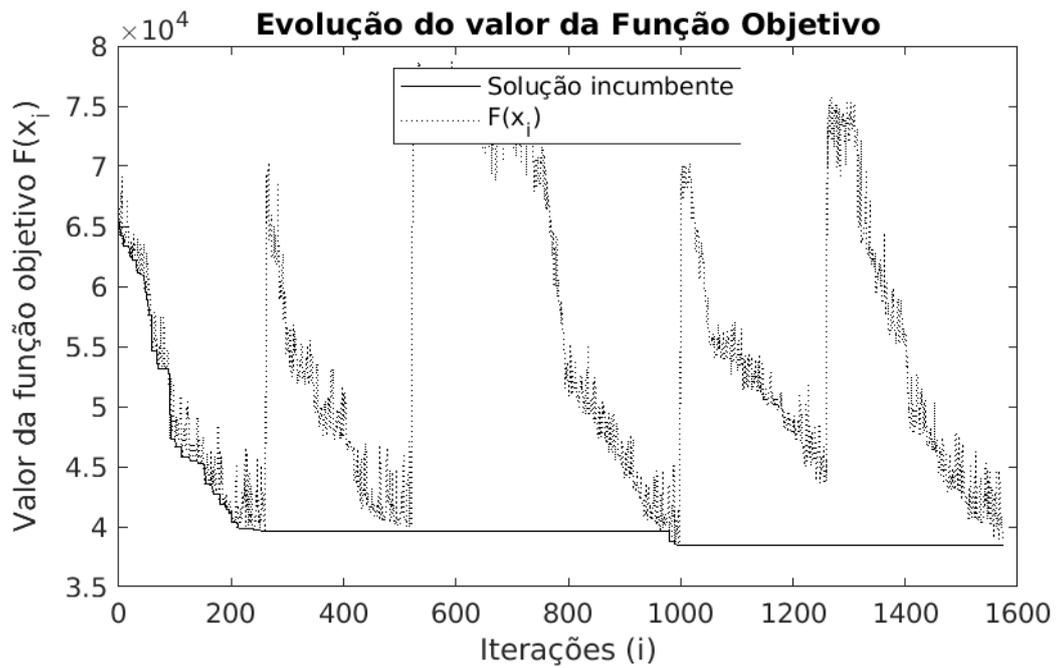


Fonte: Autor

Assim como na simulação com 35 notas, as figuras 4.19, 4.20 indicam a simulação de despacho com  $D_{ii}$ , que representa o tempo de execução das notas de serviço igual a 0. Já as figuras 4.21 e 4.22, e 4.23 e 4.24 representam, respectivamente, simulações com 250 e 500 valores de tempo de execução. Estes são os valores também utilizados na simulação com 35 notas de serviço.

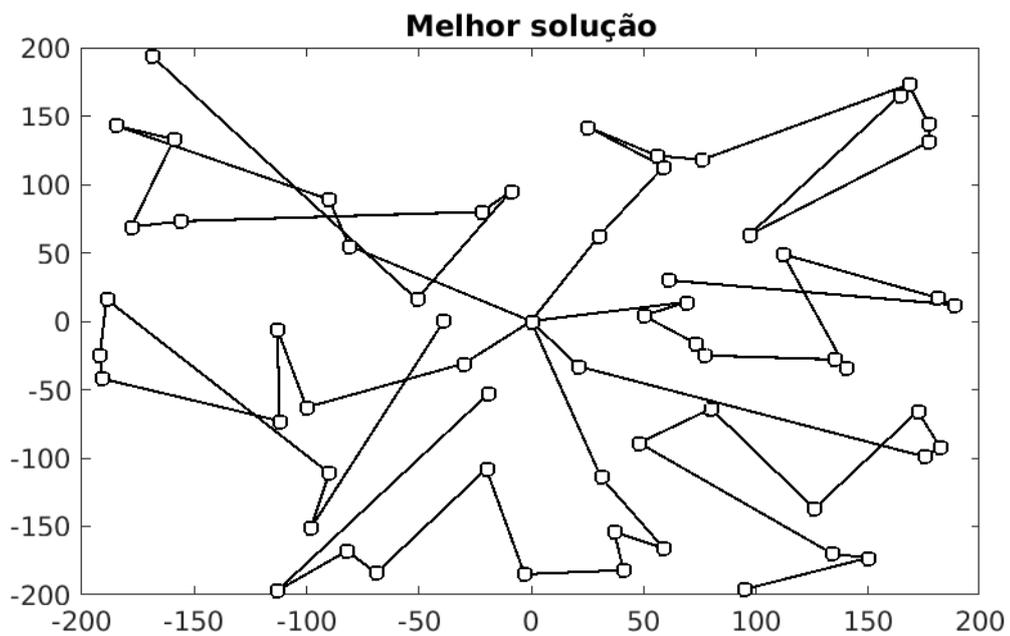
O objetivo da realização da simulação de um cenário com 60 notas e as mesmas variações que a simulação de 35 notas é avaliar a resposta do algoritmo para um cenário mais extenso. Neste cenário de mais notas e, principalmente, uma relação de notas por veículo maior, a quantidade de giros é bem superior. Enquanto nesta simulação são utilizadas cerca de 1600 iterações, no cenário anterior cerca de 700 iterações. Adicionalmente, nestas simulações há uma menor proximidade com uma otimização por distância, mesmo na simulação com  $D_{ii} = 0$  do que no cenário com 35 notas. Este efeito ocorre porque as distribuições de notas por *cluster* são menos radiais no cenário com 60 notas do que no cenário com 35 notas de serviço.

**Figura 4.19.** Simulação 60 notas com  $Dii = 0$ : evolução da função objetivo e da incumbente



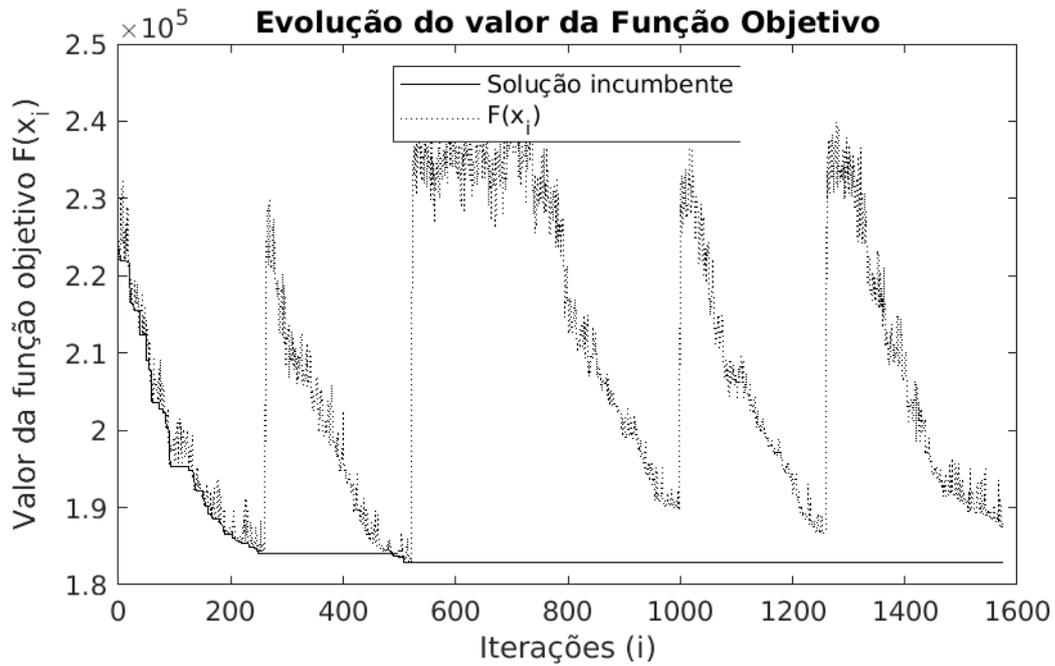
Fonte: Autor

**Figura 4.20.** Simulação 60 notas com  $Dii = 0$ : representação da melhor solução



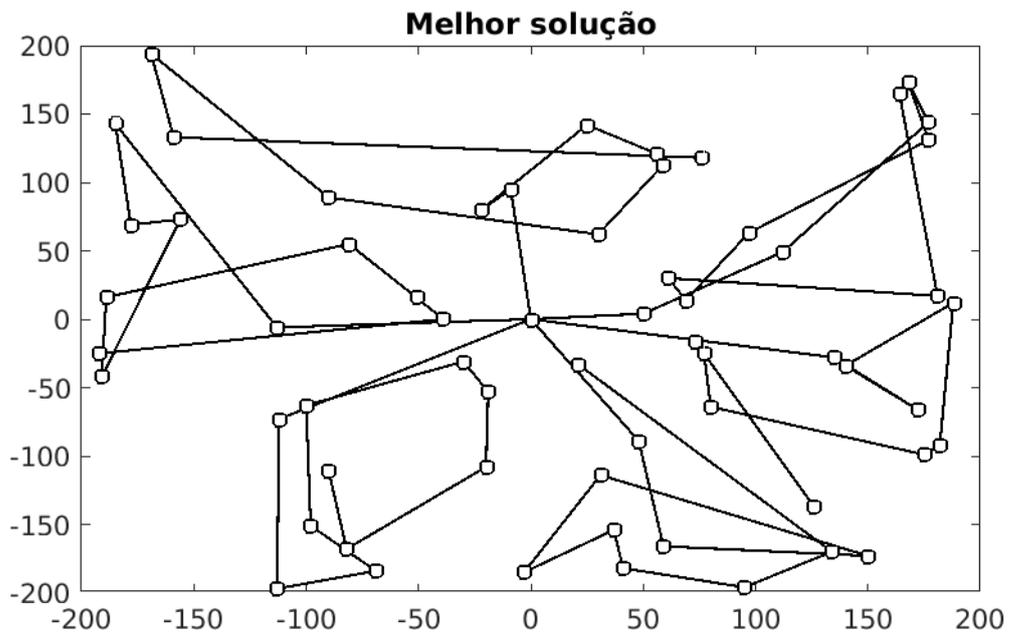
Fonte: Autor

**Figura 4.21.** Simulação 60 notas com  $Dii = 250$ : evolução da função objetivo e da incumbente



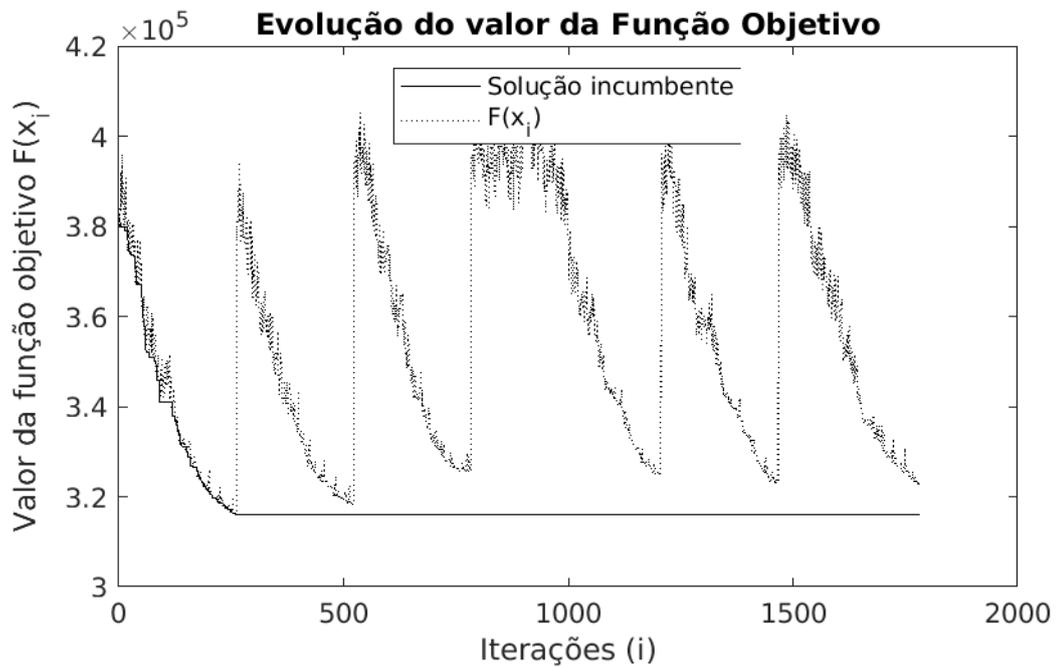
Fonte: Autor

**Figura 4.22.** Simulação 60 notas com  $Dii = 250$ : representação da melhor solução



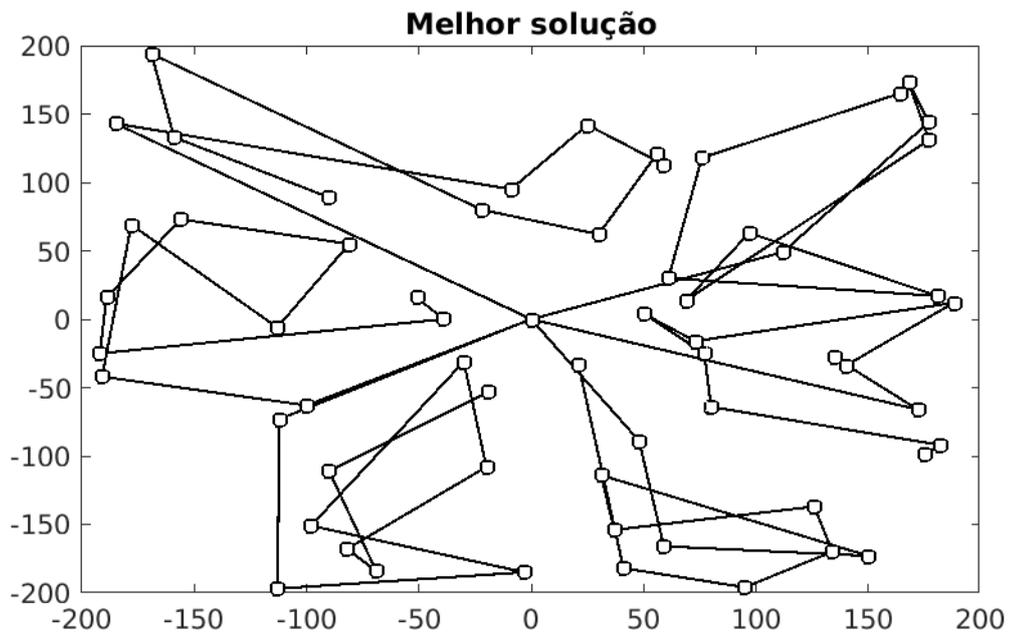
Fonte: Autor

**Figura 4.23.** Simulação 60 notas com  $Dii = 500$ : evolução da função objetivo e da incumbente



Fonte: Autor

**Figura 4.24.** Simulação 60 notas com  $Dii = 500$ : representação da melhor solução



Fonte: Autor

### 4.3 Comparativo entre modelos

É evidente que os modelos entregam resultados muito distintos. Um modelo de otimização de distância certamente será diferente de um modelo de otimização multicritério. Entretanto, em determinadas situações, eles se assemelham, visto que a otimização de rota de uma certa forma vai reduzir também o custo global de uma função multicritério, efeito este mais latente nas simulações com tempos de execução nulos.

Esta seção discorrerá sobre o efeito da utilização do melhor resultado de um dos modelos na função objetivo do outro. Os questionamentos derivados deste tópico são: qual é o efeito da utilização da melhor solução obtida do modelo de otimização de roteiro no modelo multicritério de minimização de custos globais e vice-versa.

As tabelas a seguir resumem o resultado da utilização cruzada de modelos para as duas simulações do problema, de 35 e 60 notas de serviço, respectivamente. As colunas representam a utilização da melhor solução para cada cenário, distância e custo global, e para cada simulação, 35 e 60 notas. Já as linhas indicam a utilização de cada função objetivo: a primeira que calcula as distâncias totais percorridas e a segunda o custo global da função multicritério. O valor indicado em cada célula da tabela indica o resultado da função objetivo da respectiva linha para a solução da respectiva coluna.

A tabela 4.2 indica o comparativo entre modelos para um tempo de execução nulo, ou  $D_{ii} = 0$ . Neste cenário, o algoritmo de otimização de distâncias produz uma solução que entrega um mínimo menor em ambas funções, inclusive na função multicritério. Conforme já dissertado, o tempo de execução nulo elimina o efeito da fila de serviços e a solução para minimização de distâncias é sempre uma alternativa interessante; neste caso, se mostrou melhor ainda que a solução extraída do modelo híbrido com Busca Tabu.

Entretanto, à medida que se adiciona valores de tempo de execução, a solução de minimização de distâncias aplicada à função multicritério perde valor. Na simulação para  $D_{ii} = 250$ , o valor da função multicritério para a solução de menor distância é de  $9,33 \times 10^8$  e  $1,98 \times 10^9$ , para as simulações de 35 e 60 notas respectivamente. Avaliando agora o valor da função multicritério para a solução de minimização do custo global, o resultado é significativamente melhor:  $8,00 \times 10^8$  e  $1,83 \times 10^9$ .

**Tabela 4.2.** Comparativo entre modelos para  $D_{ii} = 0$

$D_{ii} = 0$		35 notas		60 notas	
		Solução Distância	Solução Custo	Solução Distância	Solução Custo
Função Dis- tância		1,6286E+07	2,0214E+07	2,4330E+07	3,5663E+07
Função multi- critério		1,7577E+08	1,9251E+08	2,9394E+08	3,8476E+08

Fonte: Autor

**Tabela 4.3.** Comparativo entre modelos para  $D_{ii} = 250$ 

$D_{ii} = 250$	35 notas		60 notas	
	Solução Dis- tância	Solução Custo	Solução Dis- tância	Solução Custo
Função Dis- tância	1,0379E+08	1,0982E+08	1,7433E+08	1,9263E+08
Função multi- critério	9,0336E+08	7,9997E+08	1,9815E+09	1,8288E+09

Fonte: Autor

**Tabela 4.4.** Comparativo entre modelos para  $D_{ii} = 500$ 

$D_{ii} = 500$	35 notas		60 notas	
	Solução Dis- tância	Solução Custo	Solução Dis- tância	Solução Custo
Função Dis- tância	1,9129E+08	1,9719E+08	3,2433E+08	3,4301E+08
Função multi- critério	1,6309E+09	1,3338E+09	3,6691E+09	3,1607E+09

Fonte: Autor



## 5 CONCLUSÃO

Neste trabalho, foi possível desenvolver um algoritmo capaz de traduzir prioridades de despacho e roteirização de serviços de uma distribuidora de energia elétrica. Utilizando de forma combinada os métodos decisórios AHP e PROMETHEE II, foi modelado um problema multicritério (incluindo inclusive critérios subjetivos) que foi resolvido por heurísticas combinadas de Gillet e Miller (1974) e Busca Tabu. Para representação dos resultados, foram simulados despachos para dois cenários distintos, com 35 notas de serviço e 5 veículos e 60 notas de serviço e 6 veículos.

Ressalta-se, no processo de elaboração do algoritmo, a redução de esforço computacional com a utilização combinada dos dois algoritmos. A setorização possível pelo algoritmo de Gillet e Miller (1974) e na sequência a utilização da meta-heurística Busca Tabu permite a restrição do espaço de combinações para cada *cluster* de forma separada. Somado a isto, foi desenvolvido um elemento inovador no algoritmo que trata da movimentação angular dos *clusters* através da troca de pontos entre grupos. Esta troca permite uma mudança total na distribuição de notas entre *clusters*, impedindo que o algoritmo se estabilize em uma região de mínimo local.

Em relação aos resultados obtidos, constatou-se o impacto do valor do tempo de execução na configuração da melhor solução. À medida que este tempo aumenta, o efeito da fila de serviços é mais impactante e orienta a melhor solução a priorizar notas de serviço com maior criticidade, onerando uma possível configuração com melhor logística pela ponderação de maior peso.

Neste trabalho, além dos objetivos principais, houve conclusões secundárias importantes. As primeiras estão relacionadas à pesquisa anônima de priorização. Na pesquisa de comparação estabelecida pelo método AHP, percebeu-se um perfil de respostas às vezes conciliatória em algumas comparações, outras vezes totalmente díspares. Isto significa que o trabalho de otimização de critérios subjetivos e que não convergem a um denominador comum muitas vezes não tem uma resposta certa: depende muito das experiências e interpretações que cada um teve com determinada situação.

Para resolução do algoritmo multicritério, foi desenvolvido um modelo de otimização de minimização de distâncias. Além de ser sustentação do algoritmo multicritério, foi utilizado como comparação de resultados entre funções. Neste trabalho, foi de suma importância a avaliação cruzada de funções e soluções: a solução de minimização de distância aplicada na função multicritério e vice-versa. O efeito da variação de notas de serviço disponíveis e utilização de cenários com tempos de execução distintos corroboraram para uma avaliação completa do comportamento dos dois modelos desenvolvidos.

## 5.1 Trabalhos futuros

Este trabalho foi realizado utilizando um cenário estático de despacho de serviços: os roteiros elaborados consideram como ponto de partida de rota de todas as equipes o ponto central do plano geográfico. Na prática, este cenário ocorre um vez ao dia, basicamente quando inicia-se o turno de trabalho das primeiras equipes do dia, é neste momento que tem-se o cenário global de serviços disponíveis para execução e todos os eletricitistas ainda estão nas respectivas bases de trabalho.

Entretanto, o roteiro pré-definido após a execução do algoritmo é alterado constantemente, visto que ocorrências emergenciais surgem naturalmente ao longo do dia, bem como certos serviços comerciais de urgência. Com este novo cenário, é necessária uma adaptação do algoritmo agora considerando uma nova posição geográfica das equipes de campo e também a distância temporal entre elas e o fim de seus turnos de trabalho. A sugestão de trabalho futuro para adaptação do algoritmo para deixá-lo dinâmico é válida à medida que o ingresso de novos serviços para execução das equipes ocorre constantemente.

Outra proposta trata da inclusão de mais uma estação avançada no modelo de simulação, criando áreas de interferências entre as regiões de atendimento. Este modelo naturalmente traz diferenças claras na estrutura de despacho atual das distribuidoras, onde são criadas cercas virtuais para limitação do atendimento de equipes. O que nada impede a criação de uma proposta que quebre paradigmas tão enraizados no setor.

## 6 BIBLIOGRAFIA

### Referências

- ANEEL (2015). Procedimentos de regulação tarifária (proret).
- ANEEL, P. d. D. d. E. (2007a). Elétrica no sistema elétrico nacional–prodlist: Módulo 1-introdução. *Revisão*, 10:76.
- ANEEL, P. d. D. d. E. (2007b). Elétrica no sistema elétrico nacional–prodlist: Módulo 8-qualidade de energia elétrica. *Revisão*, 10:76.
- ANEEL, R. N. N. (2010). 414.
- Arab, A., Khodaei, A., Khator, S. K., Ding, K., Emesih, V. A., e Han, Z. (2015). Stochastic pre-hurricane restoration planning for electric power systems infrastructure. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 6(2):1046–1054.
- Brans, J.-P. e Vincke, P. (1985). Note—a preference ranking organisation method: (the promethee method for multiple criteria decision-making). *Management science*, 31(6):647–656.
- Brans, J.-P., Vincke, P., e Mareschal, B. (1986). How to select and how to rank projects: The promethee method. *European journal of operational research*, 24(2):228–238.
- Clarke, G. e Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, 12(4):568–581.
- da Silva, M. C. F. A., Schmitz, M., Garcia, V. J., e Bernardon, D. P. (2017). An integrated approach to forecast programmed and emergency services in electric power utilities. In *2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–4.
- Dakin, R. J. (1965). A tree-search algorithm for mixed integer programming problems. *The computer journal*, 8(3):250–255.
- Ferreira, J. C., Arns Steiner, M. T., e Siqueira Guersola, M. (2017). A vehicle routing problem solved through some metaheuristics procedures: A case study. *IEEE Latin America Transactions*, 15(5):943–949.
- Fonini, J. S. (2016). Análise de desempenho do sistema de atendimentos de serviços em concessionária de energia.
- Gendreau, M., Soriano, P., e Salvail, L. (1993). Solving the maximum clique problem using a tabu search approach. *Annals of Operations Research*, 41(4):385–403.

- Gillet, B. e Miller, L. (1974). A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *operational research*.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers & operations research*, 13(5):533–549.
- Goldbarg, E., Goldbarg, M., e Luna, H. (2017). *Otimização combinatória e metaheurísticas: algoritmos e aplicações*. Elsevier Brasil.
- Guimarães, I. G., Garcia, V. J., e Bernardon, D. P. (2015). Stochastic methodology for service management modeling in electric power utilities. In *2015 50th International Universities Power Engineering Conference (UPEC)*, pages 1–5.
- Gutin, G., Yeo, A., e Zverovich, A. (2002). Traveling salesman should not be greedy: domination analysis of greedy-type heuristics for the tsp. *Discrete Applied Mathematics*, 117(1-3):81–86.
- Ishizaka, A. e Nemery, P. (2013). *Multi-criteria decision analysis: methods and software*. John Wiley & Sons.
- Janjic, A., Savic, S., e Janackovic, G. (2012). Multi-criteria decision support for optimal distributed generation dispatch. In *2012 2nd International Symposium On Environment Friendly Energies And Applications*, pages 134–139. IEEE.
- Land, A. H. e Doig, A. G. (2010). An automatic method for solving discrete programming problems. In *50 Years of Integer Programming 1958-2008*, pages 105–132. Springer.
- Marins, C. S., SOUZA, D. d. O., e BARROS, M. d. S. (2009). O uso do método de análise hierárquica (ahp) na tomada de decisões gerenciais—um estudo de caso. *XLI SBPO*, 1:49.
- Mcmenemy, D., Paton, G., Corr, M., e Page, A. (2017). De-centralised working for outage management, including auto-dispatch. *CIREN-Open Access Proceedings Journal*, 2017(1):1018–1021.
- Mole, R. e Jameson, S. (1976). A sequential route-building algorithm employing a generalised savings criterion. *Journal of the Operational Research Society*, 27(2):503–511.
- Moreira, M. P. (2009). *Priorização dos Modos de Falha de Equipamentos Utilizando os Métodos de Análise Multicritério PROMETHEE e Fuzzy PROMETHEE*. PhD thesis, PUC-Rio.
- Ñahuis, F. V. C. (2013). Automação do despacho dinâmico de viaturas para o atendimento das ordens de serviços nas redes de distribuição de energia elétrica.

- Nurchahyo, G. W., Alias, R. A., Shamsuddin, S. M., e Sap, M. N. M. (2002). Sweep algorithm in vehicle routing problem for public transport. *Jurnal Antarabangsa Teknologi Maklumat*, 2:51–64.
- Ongsakul, W., Dechanupaprittha, S., e Ngamroo, I. (2004). Parallel tabu search algorithm for constrained economic dispatch. *IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution*, 151(2):157–166.
- Osman, I. H. e Laporte, G. (1996). *Metaheuristics: A bibliography*.
- Reeves, C. R. (1993). *Modern heuristic techniques for combinatorial problems*. John Wiley & Sons, Inc.
- Roy, B. (1981). The optimisation problem formulation: criticism and overstepping. *Journal of the Operational Research Society*, 32(6):427–436.
- Saaty, T. L. (1991). Método de análise hierárquica.
- Saaty, T. L. (1994). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Interfaces*, 24(6):19–43.
- Teles, R. M., Ivamoto, M., Mello, L. H., Neto, G., Vicente, V., e Carvalho, C. L. d. (2010). Um sistema de apoio à decisão baseado em agentes para tratamento de ocorrências no setor elétrico.
- Tolmasquim, M. T. (2011). *Novo Modelo do Setor Elétrico Brasileiro*. 1 edition.
- Xu, N., Guikema, S. D., Davidson, R. A., Nozick, L. K., Çağnan, Z., e Vaziri, K. (2007). Optimizing scheduling of post-earthquake electric power restoration tasks. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 36(2):265–284.