

UNIVERSIDADE FEDERAL DE JUIZ DE FORA
FACULDADE DE ENGENHARIA
ENGENHARIA ELÉTRICA

Jorge Felipe Barbosa Mota

**Otimização da Relação Custo Benefício de Projetos de Eficiência Energética do
Tipo Baixa Renda**

Juiz de Fora
2016

Jorge Felipe Barbosa Mota

**Otimização da Relação Custo Benefício de Projetos de Eficiência Energética do
Tipo Baixa Renda**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Orientador: Dsc. Ivo Chaves da Silva Júnior.

**Juiz de Fora
2016**

Ficha catalográfica elaborada através do programa de geração automática da Biblioteca Universitária da UFJF, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

Barbosa Mota, Jorge Felipe.

Otimização da Relação Custo Benefício de Projetos de Eficiência Energética do Tipo Baixa Renda / Jorge Felipe Barbosa Mota. -- 2016.

99 p. : il.

Orientador: Ivo Chaves da Silva Júnior

Coorientador: Leonardo Willer de Oliveira

Dissertação (mestrado acadêmico) - Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia. Programa de Pós Graduação em Engenharia Elétrica, 2016.

1. Eficiência Energética. 2. Relação Custo Benefício. 3. Otimização Bioinspirada. 4. Ant Colony Optimization. 5. Particle Swarm Optimization. I. Chaves da Silva Júnior, Ivo, orient. II. Willer de Oliveira, Leonardo, coorient. III. Título.

Jorge Felipe Barbosa Mota

Otimização da Relação Custo Benefício de Projetos de Eficiência Energética do Tipo Baixa Renda

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, da Universidade Federal de Juiz de Fora como requisito parcial a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica. Área de concentração: Sistemas de Energia Elétrica.

Aprovada em 09 de setembro de 2016

BANCA EXAMINADORA

Dsc. Ivo Chaves da Silva Júnior - Orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dsc. Leonardo Willer de Oliveira – Co-orientador

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dsc. Tales Pulinho Ramos

Instituto Federal Sudeste de Minas Gerais

Dsc. Bruno Henriques Dias

Universidade Federal de Juiz de Fora

Dedico este trabalho à minha amada mãe, em memória, com eterna saudade.

À minha esposa, Stephany, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, à minha mãe (em memória), pela dedicação de uma vida toda e por ser a principal responsável pelos meus estudos e por esse mestrado poder se realizar, assim como de todas as conquistas que obtive na minha vida.

Agradeço a Deus, pela força que me mantém no caminho da dedicação e esforço, a fim de conquistar minhas vitórias, sempre com ética e responsabilidade.

Dedico à minha esposa, Stephany Carvalho de Oliveira, pelos dias de compreensão, noites de solidão e grande apoio para realização deste trabalho.

Agradeço aos meus orientadores, Ivo Chaves da Silva Júnior e Leonardo Willer de Oliveira, pelos conhecimentos compartilhados e pela paciência nesse período de estudo.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, PPEE, e ao Grupo de Otimização Heurística e Bioinspirada da UFJF, GOHB – UFJF, pela oportunidade de realização de trabalhos em minha área de pesquisa e pela concretização desse desejo.

Aos professores da composição da banca de avaliação, pela consideração e pela participação.

“Demore o tempo que for para ver o que você quer da vida,
e depois que decidir não recue ante nenhum pretexto,
porque o mundo tentará te dissuadir.”
(ASSIM FALAVA ZARATUSTRA, Friedrich Nietzsche)

RESUMO

As concessionárias de energia são obrigadas a aplicar parte de sua receita operacional líquida na execução de projetos de eficiência energética, de acordo com a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). O projeto do tipo baixa renda é parte desse portfólio de projetos possíveis e capta a maior parte dessa aplicação. Dessa forma, torna-se de suma importância a criação de uma metodologia para dimensionar os projetos dessa tipologia e direcionar as tomadas de decisões das concessionárias de energia do Brasil. Métodos de otimização bioinspirados tratam de problemas combinatórios e não lineares, caso do equacionamento matemático do cálculo da relação custo benefício de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda.

O presente trabalho propõe a aplicação de dois métodos de otimização reconhecidos, a otimização por colônia de formigas, ou *Ant Colony Optimization* (ACO), e a otimização por enxame de partículas, ou *Particle Swarm Optimization* (PSO), para calcular e otimizar a relação custo benefício de projetos de eficiência energética regulatórios do tipo baixa renda.

Sendo assim, aplica métodos computacionais bioinspirados no dimensionamento dos projetos de eficiência energética, além de otimizar esses projetos, obtendo o melhor resultado operacional, do ponto de vista da eficiência energética, com o melhor custo para a sociedade.

Palavras-chave: Eficiência Energética. Otimização Bioinspirada. RCB. ACO. PSO.

ABSTRACT

The electricity utilities are required to invest part of its net operating income in the implementation of energy efficiency projects, according to the National Electric Energy Agency (ANEEL). The low-income type design is part of portfolio of possible projects and captures most of this application. Thus, it becomes very important to create a methodology to scale projects of this type and direct decision making of utilities in Brazil. Bioinspired optimization methods deal with combinatorial and nonlinear problems, if the mathematical equations for calculating the cost benefit rate of energy efficiency projects in low-income type.

This paper proposes two recognized bioinspired optimization methods, the Ant Colony Optimization (ACO) and the Particle Swarm Optimization (PSO) to calculate and optimize the cost effectiveness of energy efficiency regulatory projects, the low-income type.

Thus, propose a scientific methods of sizing of the energy efficiency projects, while optimizing these projects, obtaining the best operating result, from the point of view of energy efficiency with the best cost to society.

Keywords: Energy Efficiency. Bio-inspired Optimization. CBR. ACO. PSO.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Economia de energia decorrente de ações do Procel nos últimos cinco anos	22
Figura 2 - Cinco grupos que mais investem em eficiência energética com recursos do PEE	26
Figura 3 - Extratos por tipologias dos recursos advindos do PEE	28
Figura 4 - Ponte binária ligando o formigueiro à fonte de comida	33
Figura 5 - Caminhos escolhidos pelas formigas após um determinado tempo	34
Figura 6 – Fluxograma básico do ACO.....	37
Figura 7 – Pseudocódigo do ACO.....	37
Figura 8 – Fluxograma básico do PSO.....	41
Figura 9 – Pseudocódigo do PSO.....	42
Figura 10 - Fluxograma básico do algoritmo ACO aplicado	58
Figura 11 - Fluxograma básico do algoritmo PSO aplicado	60
Figura 12 - Tempos de convergência do ACO.....	67
Figura 13 - Tempos de convergência do PSO.....	67
Figura 14 – Resultado financeiro no ACO	68
Figura 15 – Resultado financeiro no PSO	69
Figura 16 - Economia de energia no ACO	70
Figura 17 - Economia de energia no PSO	70
Figura 18 - Redução de demanda na ponta no ACO	71
Figura 19 - Redução de demanda na ponta no PSO	72
Figura 20 - Valor do RCB no ACO.....	73
Figura 21 - Valor do RCB no PSO.....	73
Figura 22 – Comparativo entre energia economizada real, ACO e PSO	75
Figura 23 – Comparativo entre redução de demanda na ponta real, ACO e PSO.....	76
Figura 24 – Comparativo entre os RCBs do caso real, do ACO e do PSO.....	77

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Correspondência entre a natureza e o algoritmo artificial	34
Tabela 2 – Constantes de perdas para $k = 0,15$	53
Tabela 3 – Dados de quantitativos do projeto estudado	62
Tabela 4 – Dados regulatórios considerados para o projeto	63
Tabela 5 – Dados dos equipamentos eficientes	64
Tabela 6 – Custos anuais do projeto	64
Tabela 7 – Valores do projeto corrigidos	65
Tabela 8 – Variações das simulações aplicadas para as metodologias bioinspiradas	65
Tabela 9 – Número máximo de equipamentos	66
Tabela 10 – Parâmetros aplicados ao PSO	66
Tabela 11 – Soluções do projeto pelo ACO	74
Tabela 12 – Soluções do projeto pelo PSO	74
Tabela 13 – Investimentos por tipologia do PEE, desde 2008	91
Tabela 14 – Investimento do PEE por grupo de concessionárias de energia, desde 2008	92

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRADEE	Associação Brasileira de Distribuidoras de Energia Elétrica
ACO	Ant Colony Optimization
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CGIEE	Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética
CONPET	Programa Nacional de Racionalização de Derivados do Petróleo e do Gás Natural
CPE	Custo Por Equipamento
CRPE	Custo Relacionado Por Equipamento
CU	Custo Unitário Total
EPE	Eficiência por Equipamento
EPP	Eficiência em Prédios Públicos
GEM	Gestão Energética Municipal
IL	Índice de Lucratividade
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PBE	Programa Brasileiro de Etiquetagem
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
PEE	Programa de Eficiência Energética
PIMVP	Protocolo Internacional de Medição e Verificação
PNEE	Plano Nacional de Eficiência Energética
PROCEL	Programa Nacional Conservação de Energia Elétrica
PRORET	Procedimentos de Regulação Tarifária
PSO	Particle Swarm Optimization
QM	Quantidade Máxima
ROL	Receita Operacional Líquida
TIR	Taxa Interna de Retorno
TIRM	Taxa Interna de Retorno Modificada
TSEE	Tarifa Social de Energia Elétrica
TU	Tempo Médio de Utilização
VU	Vida Útil

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	acúmulo de feromônio
α	valor de projeto heurístico do ACO
β	valor de projeto heurístico do ACO
μ	visibilidade entre j e i no ACO
ρ	fator de evaporação
φ	valores de aceleração das partículas
ω	peso de inércia
$\Delta\tau$	depósito de feromônio por formiga na trilha
ΔP	passo de iteração
$\Delta MF(m)$	quantidade de feromônio depositado pela formiga m
BA_t	benefício anualizado do projeto, em R\$
CA_n	custo anualizado de cada equipamento, em R\$
CA_t	custo anualizado total, em R\$
CE	custo por equipamento
CE_{FLC15}	custo da lâmpada FLC de 15 Watts
CE_{FLC20}	custo da lâmpada FLC de 20 Watts
CE_{ref}	custo do refrigerador
CE_{TV}	custo da TV de LED
CED	custo evitado de demanda
CEE	custo da energia economizada
C_{fp}	custo unitário de energia fora de ponta
C_j	custo do projeto em cada ano de execução
C_p	custo unitário de energia na ponta
C_n	custos unitários de demanda e de energia
CT	custo total do projeto
EE	valor de energia economizada
F_c	fator de carga
F_{CP}	fator de coincidência na ponta
F_p	fator de perdas
FRC	fator de recuperação de capital
FRC_{lamp}	fator de recuperação de capital das lâmpadas

FRC_{ref}	fator de recuperação de capital dos refrigeradores
FRC_{TV}	fator de recuperação de capital da TV de LED
$G_{best,i}$	melhor posição global do enxame
I	taxa de desconto
j	número de anos do projeto
k	constante de proporcionalidade do sistema
L	comprimento do caminho da formiga aleatória
LE_n	constantes de perda de energia
LE_p	constante de perda de energia na ponta
LE_{fp}	constante de perda de energia fora de ponta
m	número de formigas do algoritmo
MF	matriz de feromônio
n	número de anos de investimento
NF	número de formigas da colônia
$P(m)$	probabilidade da formiga seguir o resultado ótimo
$p(t)$	probabilidade da formiga seguir por uma trilha
$P_{best,i}$	melhor posição individual da partícula
Q	constante de projeto do ACO
qtd	quantidade de equipamentos
r	valores randômicos para ajuste do algoritmo PSO
RCB	relação custo benefício
RDP	valor de redução de demanda na ponta
t	Tempo
$t_{útil}$	tempo de utilização dos equipamentos
u	tempo de vida útil dos equipamentos
v	velocidade da partícula
VAE	valor anual equivalente
VPL	valor presente líquido
x	posição da partícula

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	13
1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO.....	16
1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO	16
1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO.....	17
1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 INTRODUÇÃO.....	19
2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA	19
2.2.1 Conceito e Meio Ambiente	19
2.2.2 Eficiência Energética no Brasil	21
2.2.3 Programa de Eficiência Energética da ANEEL	24
2.2.4 Projeto de Tipologia Baixa Renda	28
2.3 PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO	30
2.3.1 Ant Colony Optimization (ACO)	32
2.3.2 Particle Swarm Optimization (PSO)	38
2.4 CONCLUSÕES	43
3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA PROPOSTO	44
3.1 INTRODUÇÃO.....	44
3.2 RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO (RCB).....	44
3.3 CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO.....	47
3.3.1 Cálculo do Custo Anualizado (CA_t)	47
3.3.2 Cálculo do Benefício Anualizado (BA_t)	48
3.3.3 Projeto plurianuais	53
3.4 METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO.....	54
3.4.1 Algoritmo ACO aplicado	54
3.4.2 Algoritmo PSO aplicado	58
4 ESTUDO DE CASO	62
4.1 INTRODUÇÃO.....	62
4.2 ESTUDO DE CASO	62
4.2.1 Dimensionamento do Projeto Real	62
4.2.2 Condições para Aplicação dos Métodos Bioinspirados	65

4.2.3 Resultados	66
4.3 CONCLUSÕES	74
5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	78
5.1 INTRODUÇÃO	78
5.2 CONCLUSÕES	78
5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	79
REFERÊNCIAS	82
APÊNDICE A - Dados Econômicos do PEE	91
APÊNDICE B – Detalhamento do cálculo do RCB do Estudo de Caso	93

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O presente trabalho está relacionado à aplicação de metodologias de otimização bioinspirada para o dimensionamento e a otimização de projetos de eficiência energética regulatórios da ANEEL do tipo baixa renda.

Entre os anos de 2012 e 2016, o cenário energético vem contribuindo para a ênfase dada ao tema de eficiência energética. A necessidade de otimização de recursos dá força para o desenvolvimento de programas de incentivo ao consumo racional. Torna-se de fundamental importância desenvolver metodologias para otimizar e dimensionar projetos atrelados à utilização de recursos naturais.

A eficiência energética, em sua essência, está associada ao uso sustentável e eficiente dos recursos energéticos disponíveis. Abrange o conjunto de ações que resultam na redução do consumo de energia, sem que haja perda de quantidade e qualidade do bem ou serviço fim da atividade, e sem redução do conforto proporcionado pelo equipamento elétrico.

Eficiência energética é utilizar a energia de forma a obter o máximo benefício com o menor consumo, evitando desperdícios ou o uso inadequado, sem diminuir a qualidade de vida, o conforto, a segurança e a produtividade [1].

A importância das ações de eficiência energética vem aumentando à medida que as mudanças climáticas no mundo afetam, cada vez mais, a oferta de energia. Com a redução da oferta, vem aumentando o número de iniciativas internacionais a fim de incentivar a eficiência energética de todas as fontes, incluindo a energia elétrica.

O aumento da eficiência energética funciona como uma fonte virtual de energia, à medida que reduz o consumo e evita a necessidade da expansão do sistema elétrico [2].

Com as discussões e acordos mundiais para o desenvolvimento de ações sustentáveis, fica cada vez mais intenso a criação de políticas e leis de eficiência energética em todos os países. O Brasil não difere desse contexto, criando e revisando os atuais programas existentes.

No país existem programas consistentes de eficiência energética sendo desenvolvidos:

- PROCEL (Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica);
- CONPET (Programa Nacional da Racionalização do Uso dos Derivados de Petróleo e do Gás Natural);

- INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia); e
- Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica (PEE - ANEEL).

Um dos movimentos principais do incentivo à eficiência energética no Brasil foi demonstrado pela obrigatoriedade imposta pela ANEEL às concessionárias e permissionárias de investirem uma parcela de sua receita anual em programas de eficiência energética [3].

Através do Programa de Eficiência Energética (PEE) as empresas distribuidoras de energia elétrica necessitam investir 0,5% de sua ROL em eficiência energética, tendo um portfólio de projetos de diversas tipologias.

Os projetos de atendimento a comunidades de baixo poder aquisitivo são contemplados pelo PEE e recebem o maior aporte de investimentos do programa [2]. Até 2013, foram realizados 377 projetos dessa tipologia, num valor total de 2,3 bilhões de reais em investimento. O resultado energético é de 2,3 TWh/ano em economia de energia global [4].

Dirigidos a comunidades populares incluem a substituição de equipamentos ineficientes (lâmpadas, refrigeradores, chuveiros elétricos, televisores, entre outros), ações educacionais, como palestras técnicas e atividades para combater o furto de energia e estimular o uso eficiente e seguro de energia, regularização de consumidores clandestinos, instalação de padrões de entrada e reforma das instalações internas.

Poderão ser atendidas unidades consumidoras de cunho filantrópico e assistencial, associações de bairro, creches, escolas, hospitais públicos e afins, desde que não exerçam atividade com fins lucrativos e estejam localizadas geograficamente nas comunidades atendidas, caracterizando atendimento predominantemente aos consumidores ali residentes.

Os projetos do tipo baixa renda têm por objetivo induzir o uso eficiente de energia para esse tipo de consumidor. O projeto é acompanhado por uma etapa de Medição e Verificação (M&V) e deve atender aos critérios de Relação Custo Benefício (RCB) determinados pelos Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE) da ANEEL, que relaciona os custos do projeto com os benefícios alcançados, sendo esse o principal critério para a avaliação da viabilidade econômica de projetos de eficiência energética.

O custo envolve os aportes financeiros para a realização do projeto enquanto o benefício consiste na economia de energia e redução da demanda no horário de ponta durante a vida útil do projeto. Toda a racionalidade de um projeto de eficiência energética está no investimento em ações que resultam em benefícios maiores que os obtidos através da expansão do sistema elétrico.

Apesar dos montantes apresentados, tanto em valores econômicos quanto em valores energéticos, os projetos de eficiência energética do tipo baixa renda são calculados de forma empírica em grande parte das concessionárias e permissionárias de energia elétrica.

Pesquisadores de diferentes áreas têm se inspirado na observação da natureza para desenvolver métodos de otimização. Esta nova área é conhecida como inteligência coletiva (ou *Swarm Intelligence*), baseada nas atividades coletivas de colônia de insetos para o desenvolvimento de novos algoritmos de simulação e otimização [5]. Nesse trabalho são apresentados dois algoritmos computacionais bioinspirados para o planejamento e dimensionamento dos projetos do tipo baixa renda, a fim de minimizar a Relação Custo Benefício (RCB).

A primeira metodologia aplicada é a otimização por colônia de formigas (*Ant Colony Optimization*), desenvolvido por Dorigo, em 1991. Trata-se de uma meta-heurística recente, aplicada para problemas de origem combinatória, baseado na construção de soluções e inspirada no comportamento de formigas na busca por alimentos.

A segunda metodologia de otimização aplicada foi o método por enxame de partículas (*Particle Swarm Optimization*), introduzido por Kennedy e Eberhart, em 1995 [2]. Trata-se de uma técnica computacional evolucionária baseado no comportamento social de uma população de pássaros [6].

Os algoritmos são aplicados a um caso real de projeto de tipologia baixa renda. O resultado do estudo de caso, dimensionado empiricamente pela concessionária executora, foi comparado com os resultados obtidos nas aplicações dos algoritmos bioinspirados.

O propósito do problema de otimização é minimizar o indicador técnico dos projetos de eficiência energética do tipo baixa renda, respeitando o limite de custo determinado pela regulamentação da ANEEL.

Vale salientar que, dentre as bibliografias e trabalhos publicados consultados, até mesmo em experiência prática do autor, não foram encontrados métodos matemáticos para a definição da solução ideal para problemas de RCB de projetos baixa renda. Todas as decisões em torno dessa tipologia de projeto são tomados através de tentativa e erro, até se encontrar um RCB satisfatório.

Propõe-se um modelo matemático computacional para dimensionamento desses projetos e a minimização do índice técnico, visando a melhoria de patrimônio público e melhores resultados energéticos.

O texto mostra a real visão dos projetos de eficiência energética regulamentados, as diferentes interpretações dos resultados e a base de cálculo de eficiência energética desses

projetos, além de explanar sobre a forma de avaliação da viabilidade dos projetos: a relação custo benefício.

1.2 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

Considerando o fato de não ter sido encontrada proposta de algoritmos computacionais que viabilizem soluções para projetos do programa de eficiência energética do tipo baixa renda e análises de possíveis resultados melhores para indicadores de RCB, este trabalho tem como objetivo dimensionar projetos do tipo supracitado, minimizando a relação custo benefício.

Espera-se que através do dimensionamento ótimo de quantidade de equipamentos haja melhoria dos resultados técnicos, redução de demanda na ponta e de economia de energia, e dos resultados financeiros dos projetos de eficiência energética.

Para tal, faz-se uso de duas metodologias meta-heurísticas reconhecidas, baseada no comportamento coletivo da natureza, com dois objetivos básicos:

- Dimensionar projetos de baixa renda dentro do RCB regulatório utilizando algoritmos computacionais;
- Otimizar os resultados dos projetos do tipo baixa renda, propondo a melhor solução viável, dentro de requisitos técnicos pré-estabelecidos, obtendo os melhores resultados de eficiência energética, reduzindo o consumo de energia e diminuindo a demanda na ponta;
- Criticar as soluções ótimas encontradas no algoritmo computacional a fim de torná-las comercialmente aplicáveis em projetos de eficiência energética das concessionárias, comparando as soluções encontradas com resultados reais.

1.3 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

As principais contribuições desta dissertação podem ser resumidas nos seguintes pontos:

- Aplicação de processos computacionais bioinspirados para dimensionamento de projetos de eficiência energética regulatórios do tipo baixa renda, propondo um modelo para cálculos de projetos supracitados;

- Otimização dos resultados de projetos de eficiência energética do ponto de vista da sociedade e da concessionária de energia, dimensionando o projeto de tal forma a obter o melhor RCB quando comparado aos dimensionamentos realizados empiricamente;
- Redução de demanda na ponta e aumento da economia de energia advindos do dimensionamento de projetos através de aplicações computacionais;
- Ineditismo no que diz respeito ao dimensionamento de projetos do tipo baixa renda através de meta-heurísticas e aplicações computacionais.

1.4 PUBLICAÇÕES DECORRENTES DA DISSERTAÇÃO

- Mota, J. F. B.; Júnior, I. C.; Oliveira, L. W.; de Sá, R. F. “Otimização de RCB de projetos de eficiência energética do tipo baixa renda via Ant Colony”. IEEE INDUSCON. Juiz de Fora, Brasil, 2014.
- Mota, J. F. B.; Júnior, I. C.; Oliveira, L. W. “Otimização de projetos de eficiência energética do tipo baixa renda via enxame de partículas”. XI Latin American Congress Electricity Generation and Transmission. São José dos Campos, Brasil, 2015.
- Mota, J. F. B.; Júnior, I. C.; Oliveira, L. W. “Comparação entre meta-heurísticas bioinspiradas aplicadas à otimização de projetos de eficiência energética de baixa renda”. XLVII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional (SBPO). Porto de Galinhas, Brasil, 2015.

1.5 ORGANIZAÇÃO DA DISSERTAÇÃO

Além desse capítulo, este trabalho possui mais quatro capítulos.

No capítulo II é feita uma revisão da literatura, abordando os aspectos de eficiência energética, de projetos do programa de eficiência energética da ANEEL, com ênfase em projetos do tipo baixa renda, e das metodologias bioinspiradas utilizadas, otimização por colônia de formigas e otimização por enxame de partículas.

No capítulo III será abordado a formulação matemática do problema proposto, o cálculo de RCB e a aplicação direta dos algoritmos utilizados para a otimização do problema proposto.

No capítulo IV será abordado estudo de caso real para utilização dos algoritmos propostos, comparando-se os resultados obtidos pelas soluções computacionais com o resultado real obtido no caso de uma concessionária de energia.

No capítulo V são apresentadas as principais conclusões referentes às metodologias propostas, além de propostas de trabalhos futuros e análises críticas dos resultados encontrados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO

A energia está presente em nosso dia a dia. Por esse motivo, o campo de estudos relacionados é bastante vasto, desde o uso de recursos naturais até aspectos relacionados ao desempenho das modernas tecnologias, envolvendo desde temas técnicos a temas socioeconômicos e ambientais [7].

O uso da energia elétrica se tornou essencial nas residências, nas atividades agrícolas, nos setores industrial e de serviços, para fins de condicionamento, cocção, iluminação, força motriz, entretenimento e lazer [8].

É indiscutível que a energia elétrica é essencial para o desenvolvimento humano, tendo uma demanda crescente. Contudo, uma das consequências é um maior impacto ambiental.

Tanto no cenário mundial quanto no nacional dos anos 2000, tem-se intensificado a preocupação com o uso de recursos naturais e energéticos. Vários têm sido os esforços para tentar reverter os problemas climáticos mundiais, sendo incentivadas desde novas fontes energéticas a mudanças comportamentais.

Nesse sentido, a eficiência energética passa a ser uma ciência de destaque nas pesquisas e estudos de engenharia elétrica e tem sido uma política incentivada em todos os aspectos, tornando-se cada vez mais viável economicamente.

O avanço tecnológico têm contribuído para novas possibilidades dentro dessa ciência. As metodologias bioinspiradas aplicadas a otimização de processos podem contribuir para maximizar os benefícios energéticos de projetos ou minimizar os custos envolvidos, abrindo possibilidade para novos projetos.

2.2 EFICIÊNCIA ENERGÉTICA

2.2.1 Conceito e Meio Ambiente

Eficiência é definida como a otimização positiva da relação entre a energia útil de saída e a energia de entrada de um processo [9].

Eficiência energética está relacionado à utilização dos benefícios energéticos, das tecnologias e dos avanços advindos da energia elétrica de modo racional e sem desperdícios.

Ser eficiente energeticamente significa executar ações que obtenham o mesmo resultado com menos consumo energético ou obter melhores resultados com o mesmo consumo de energia.

Promover a eficiência energética é utilizar o conhecimento de forma aplicada, empregando os conceitos de engenharia, da economia e da administração aos sistemas energéticos [10].

Às vistas da lei nº 10.295, a eficiência energética está relacionada diretamente com o uso racional de energia elétrica. Nessa lei o poder executivo estabelece níveis máximos de consumo de energia elétrica ou, sob outra ótica, níveis mínimos de eficiência elétrica para equipamentos que consomem energia elétrica utilizados no uso final [11].

Do ponto de vista prático, a eficiência energética trata um conjunto de atividades e políticas que reduzem os custos da energia e/ou aumentam a quantidade de energia oferecida sem alterações da geração [12].

Uma das grandes vantagens está relacionada ao fato de o investimento em eficiência energética ser, na maioria das vezes, menos oneroso que produzir mais energia. Assim, a efficientização energética atua como uma fonte alternativa à geração tradicional, possibilitando postergar investimentos no sistema elétrico de potência [10].

Outro objetivo chave da eficiência energética é a competitividade comercial e industrial, atuando como fonte de redução dos custos de energia para o consumidor final e minimizando a probabilidade de falta de energia, contribuindo ainda para o aumento da confiabilidade do sistema elétrico nacional [13].

Eficiência energética e meio ambiente são dois aspectos que estão totalmente associados. A forma como a energia é produzida e utilizada está na origem dos problemas ambientais atuais [14].

A eficiência energética pode contribuir para a redução dos impactos ambientais causados pelo efeito estufa. Ações energeticamente racionais têm um impacto direto e imediato, já que reduz a emissão de poluentes como o CO₂.

Os primeiros acordos ambientais, que começaram a elevar a eficiência energética à patamares privilegiados no atendimento à demanda energética, começaram nas décadas de 70 e 80, quando ocorreram frequentes crises energéticas no setor do petróleo [15].

A confirmação da ligação entre eficiência energética e meio ambiente pode ser ratificada pelo fato de o primeiro passo para oficialização e criação de programas de eficiência energética no mundo terem sido realizados após o protocolo de Kyoto, documento das Nações Unidas sobre as mudanças climáticas [16]. O protocolo de Kyoto reuniu, em um acordo global,

160 países para determinar a redução drástica das emissões de CO₂ no setor industrial, reduzindo o efeito estufa.

A elevação da eficiência energética pode ser alcançada de duas formas:

- Melhor gestão energética e boas práticas de consumo;
- Tecnologias e equipamentos eficientes.

Qualquer umas das duas vias diminui o consumo específico de energia, mas a combinação das duas é o que permite alcançar o ponto ótimo [17].

Pode-se afirmar que a eficiência no uso da energia e a redução ao mínimo do impacto ambiental que produz a utilização de energéticos é, na sua atualidade, uma necessidade do desenvolvimento sustentável da humanidade [18].

2.2.2 Eficiência Energética no Brasil

Assim como no restante do mundo, o Brasil caminhou para a criação de programas que incentivam a eficiência energética e a conservação de energia elétrica em meados dos anos 80 e início dos anos 90.

Em 2001, a eficiência energética tornou-se finalidade de política energética nacional com a criação da Lei da Eficiência Energética, a Lei nº 10.295/2001. A citada legislação dispõe sobre a política nacional de conservação e uso racional de energia e dá outras diretrizes técnicas para o tratamento do assunto: Determina, de modo compulsório, a existência de níveis mínimos de eficiência energética de máquinas e aparelhos, bem como das edificações construídas, com base em indicadores técnicos [19].

Hoje, o país possui programas consistentes sendo desenvolvidos [20]:

- PROCEL: Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – Trata-se de um programa do governo federal, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia e executado pela Eletrobrás. Teve início em 1985, a fim de promover o combate ao desperdício e atuar nas áreas de equipamentos, edificações, iluminação pública, poder público, indústria, comércio e educação [21].

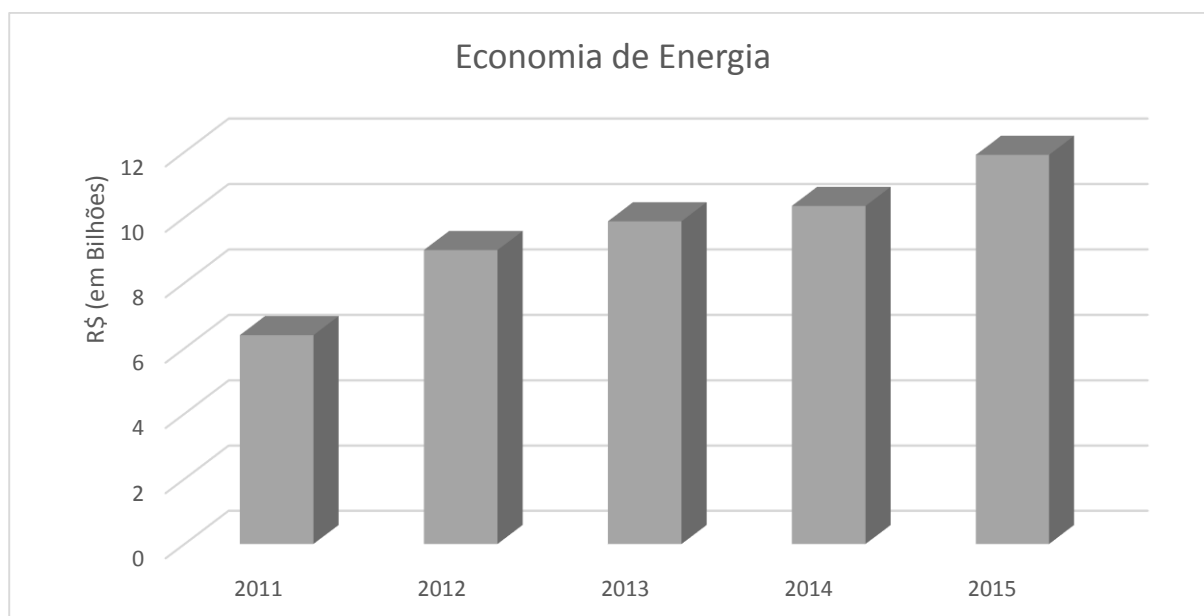
A atuação do PROCEL acontece através de seus subprogramas, que atualmente são [22]:

- Procel GEM: Procel Gestão Energética Municipal
- Procel Sanear: Eficiência Energética no Saneamento Ambiental
- Procel Educação: Informação e Cidadania

- Procel Indústria: Eficiência Energética Industrial
- Procel Edifica: Eficiência Energética em Edificações
- Procel EPP: Eficiência Energética em Prédios Públicos
- Procel Reluz: Eficiência Energética na Iluminação Pública e Semáforos
- Selo Procel: Eficiência Energética em Equipamentos
- Procel Info: Centro Brasileiro de Informação de Eficiência Energética

Nos 22 anos de existência do programa foram investidos cerca de 2,689 bilhões de reais em ações de eficiência energética. Com o investimento foi possível uma economia de energia total de 92,2 bilhões de KWh [23]. Os resultados acumulados dos últimos cinco anos do programa, em termos de eficiência energética, são mostrados no Gráfico 1.

Figura 1 - Economia de energia decorrente de ações do Procel nos últimos cinco anos



Fonte: PROCEL, 2016

- CONPET: Programa Nacional de Racionalização do Uso de Derivados de Petróleo e Gás Natural – Trata-se de um programa do governo federal instituído em 1991 para promover a cultura antidesperdício no uso dos recursos naturais não renováveis no país. O programa é vinculado ao Ministério de Minas e Energia e executado pela Petrobrás [24].

O CONPET atua em diversos setores, estimulando o uso racional de recursos e de energia de diversos tipos e origens.

Os principais projetos do CONPET são [25]:

- CONPET na escola: projeto de educação e comportamental voltado para alunos e professores das redes de ensino fundamental;

- Programa Economizar: voltado para o apoio técnico gratuito às empresas de transporte rodoviário, visando racionalizar o uso de óleo diesel;
- Projeto Ônibus a Gás: voltado para estimular o uso do gás natural no transporte coletivo urbano, na cidade do Rio de Janeiro;
- Projeto Transportar: voltado para fornecimento de apoio técnico a frotas de caminhão tanque que abastecem na Petrobrás;
- Programa Brasileiro de Etiquetagem (PBE): programa de conservação de energia que orienta os consumidores quanto a eficiência energética de alguns produtos comercializados no país.

• INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia – O INMETRO tem um projeto de etiquetagem específico para eficiência energética, o PBE (Programa de Etiquetagem Brasileiro). O PBE possui dois focos principais [19]:

- Prover informações úteis que influenciam a decisão de compra dos consumidores, que podem levar em conta outros atributos além do preço;
- Estimular a competitividade da indústria, induzindo o processo de melhoria contínua promovido pela escolha consciente do consumidor.

Com esse embasamento, o INMETRO passou a fazer exigências mínimas para equipamentos elétricos de acordo com estudos do Comitê Gestor de Indicadores de Eficiência Energética (CGIEE).

Todos os programas do INMETRO voltados para eficiência energética são realizados em parceria com o Procel e CONPET, que destacam os produtos mais eficientes.

Cabe ao INMETRO criar condições e designar laboratórios para certificar os equipamentos novos dentro da política de eficiência energética nacional, como lâmpadas LED, refrigeradores, lavadoras de roupa, televisões, entre outros.

• PEE/ANEEL: Programa de Eficiência Energética da Agência Nacional de Energia Elétrica – tem o objetivo de promover o uso eficiente de energia elétrica, em todos os setores da economia, por meio de projetos que demonstrem a importância e viabilidade econômica de melhorias da eficiência energética de equipamentos, processos e usos finais de energia [26].

O PEE da ANEEL atende à Lei 9.991/2000, e obriga as concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica a aplicar 0,5% da receita operacional líquida em programas de eficiência energética [27].

2.2.3 Programa de Eficiência Energética da ANEEL

O sistema de concessão de distribuição de energia elétrica no Brasil passou por uma mudança a partir de 1995, quando iniciou o processo de privatização das empresas. Desde então o governo federal buscava uma forma de garantir que as empresas, mesmo que privadas, investissem em eficiência energética [28].

A ANEEL foi criada com a competência de incentivar o combate ao desperdício de energia no que diz respeito a todas as formas de produção, transmissão, distribuição, comercialização e uso de energia [29]. A partir da criação do novo órgão regulador, as empresas de distribuição tinham cláusulas que faziam com que investissem na conservação de energia elétrica, com apresentação anual de programas estruturados, sobre risco de penalidades. Teve início, em 1998, um primeiro esboço do programa de eficiência energética.

A obrigatoriedade teve início em 2000 com a Lei nº 9.991, que estabeleceu a aplicação do montante de 0,5% da receita operacional líquida das concessionárias e permissionárias de serviços públicos de distribuição de energia elétrica em programas de eficiência energética na oferta e uso final de energia [30]. Foi criado assim o Programa de Eficiência Energética da ANEEL.

O investimento no PEE, desde o seu primeiro ciclo ANEEL (período anual de julho a junho), não apresentou grande evolução. Até o ciclo 2006/2007, a obrigação legal era fixada anualmente e não era atualizada monetariamente [31]. Com a nova regulamentação da ANEEL, com mais flexibilização na apresentação de projetos e com a correção mensal do saldo da conta do PEE pela taxa SELIC, os planos de investimentos começaram a apresentar consideráveis acréscimos no volume de recursos.

O objetivo chave do programa é demonstrar à sociedade a importância e a viabilidade econômica de ações de combate ao desperdício de energia elétrica por meio de melhoria dos equipamentos elétricos e de mudanças de hábitos de consumo. Para tal, todos os projetos devem ser viáveis economicamente do ponto de vista da sociedade, buscando maximizar os benefícios públicos da energia economizada e da demanda evitada [32].

O PEE da ANEEL é regido por um manual chamado de Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE), que teve sua última atualização em 2013.

Para elaboração do projeto de acordo com o manual algumas etapas são obrigatórias, como a realização do pré-diagnóstico energético. A etapa de pré-diagnóstico e de diagnóstico energético têm como premissa a definição da linha de base do projeto. Essa etapa

inicial deve ser verificada, fazendo parte da medição e verificação do projeto, a fim de criar as metas e a viabilidade técnica preliminar dos projetos.

Em seguida, é realizada a etapa de execução. Não há normatização ou regras para essa etapa. Deve ser realizada de acordo com a linha de base definida e das boas práticas de engenharia e obras.

Por fim, é realizado a etapa de medição e verificação das ações de efficientização, a fim de confirmar as premissas iniciais. A M&V deve seguir padrões do Protocolo Internacional de Medição e Verificação (PIMVP) e o manual técnico de medição e verificação da ANEEL. Nessa etapa são medidos os ganhos energéticos em campo, como economia de energia e redução de energia no horário de ponta, contabilizando qual o ganho energético real com o investimento realizado [33].

Tanto a geração da linha de base quanto a M&V após a execução do projeto devem obedecer critérios técnicos para aceitação da viabilidade técnica. O principal critério para avaliação dos projetos de eficiência energética, previsto no PROPEE, é o critério de relação custo benefício do projeto, que relaciona os custos do projeto com os benefícios energéticos alcançados [20]. O custo envolve os aportes de capital financeiro para a realização das ações de eficiência. O benefício energético envolve a economia de energia e a redução de demanda no horário de ponta, levando em consideração a vida útil dos equipamentos do projeto.

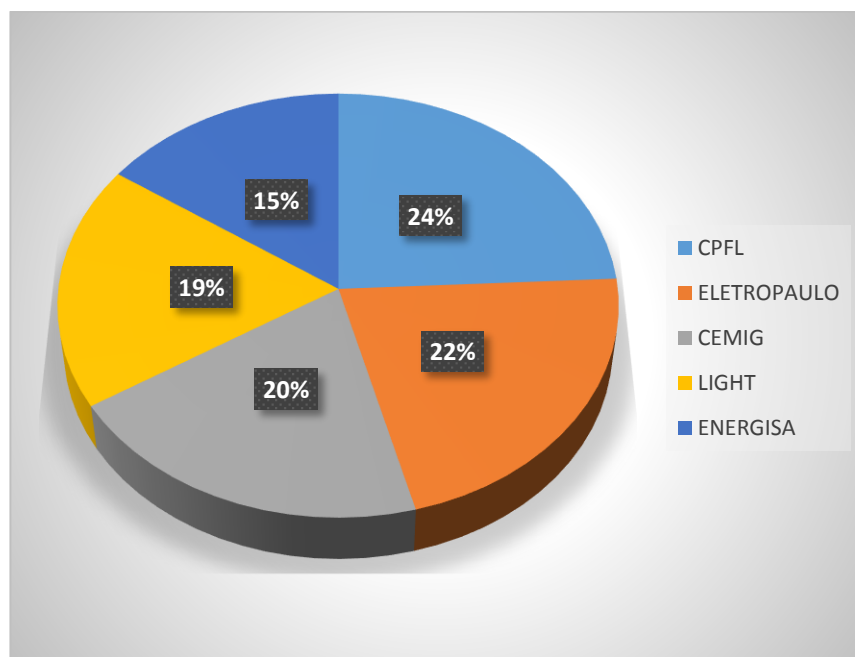
Toda a racionalidade do projeto está no investimento em ações que resultam em benefícios maiores que os obtidos através da expansão do sistema elétrico [20].

O detalhamento de cálculos matemáticos e da racionalidade da viabilidade técnica de projetos serão abordados no capítulo III desse texto.

O PEE da ANEEL constitui um instrumento do Plano Nacional de Eficiência Energética (PNEE), que tem como meta a redução de 106,6 TWh até 2030 [34]. Todos os recursos são advindos das concessionárias e permissionárias.

O Gráfico 2 demonstra os cinco grupos que mais investiram em eficiência energética desde a criação do programa até março de 2016, de acordo com a ROL de cada grupo.

Figura 2 - Cinco grupos que mais investem em eficiência energética com recursos do PEE



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

No apêndice A são mostrados os valores de investimentos dos onze grupos que mais investem no PEE.

Segundo Pompermayer, o programa deve priorizar investimentos em fontes renováveis, que são alternativas para potencializar os ganhos de eficiência energética e que contribuem para conscientização da população [35].

O PROPEE contempla nove tipologias de projetos possíveis para as concessionárias, sendo livre a elaboração do escopo do projeto dentro de cada classificação [33]. As tipologias presentes no PROPEE são:

- Setor Industrial: são projetos voltados para otimização de processos, introdução de motores eficientes, sistemas de gerenciamento energético, entre outros voltados para instalação de grande, médio e pequeno porte industrial;
- Setor de comércio e serviço: similar a projetos industriais porém voltados para instalações comerciais e de serviço;
- Poder público: são projetos de efficientização de equipamentos, melhoria de instalações e gestão energética executados em instalações de responsabilidade de pessoa jurídica de direito público;
- Serviços públicos: são execuções similares ao poder público voltadas para serviços de saneamento, prestadores de serviço, hospitais ou quaisquer serviços sob concessão;

- Setor rural: aborda projetos voltados para consumidores classificados como rurais;
- Setor residencial: são projetos que atuam em melhorias de instalação, bônus para eletrodomésticos eficientes e gestão energética em condomínios ou residências que não sejam baixa renda;
- Projetos educacionais: são projetos voltados a difundir o conceito de eficiência energética e desenvolvimento sustentável [27]. São voltados para escolas e abordam conceitos de eficiência energética para alunos e professores, capacitando multiplicadores;
- Iluminação pública: tem o objetivo de apoiar as prefeituras municipais na melhoria da eficiência energética dos sistemas de iluminação pública através de instalação de equipamentos eficientes;
- Baixa renda: são projetos voltados para ações de inserção do conceito de eficiência energética nas comunidades de baixo poder aquisitivo e incentivo ao uso de equipamentos eficientes, com cunho filantrópico e social.

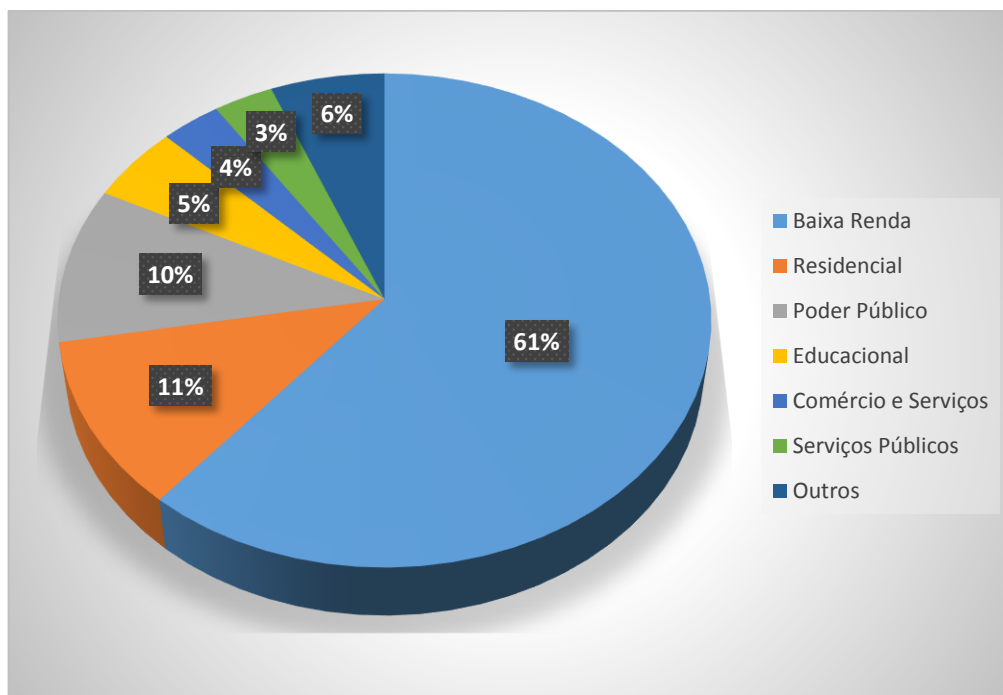
O PROPEE ainda prevê alguns projetos classificados como especiais. São projetos especiais os que por sua relevância ou característica não típica merecem atenção especial tanto da distribuidora quanto do regulador [27]. São classificados como especial:

- Projeto prioritário: são projetos que visam atender a alguma política nacional. São definidos juntamente com o Poder Executivo Federal de acordo com interesse ou relevância de políticas públicas;
- Projeto piloto: são projetos inéditos e promissores [33]. Visam consolidar alguma tecnologia ou prática de eficiência energética para uma pequena escala;
- Projeto Cooperativo: são projetos desenvolvidos por mais de uma empresa, possibilitando a atuação conjunta de distribuidoras para ganhar economia de escala, gestão de escopo, melhorias de práticas e aumento da qualidade dos projetos. Os benefícios energéticos de cada área de concessão devem corresponder aos investimentos financeiros proporcionalmente.

Há ainda um módulo dedicado a projetos com fontes incentivadas. São projetos que visam incentivar a adoção de fontes renováveis pelo consumidor, difundindo novas tecnologias e novas possibilidades de geração distribuída.

De acordo com a tabela disponibilizada pela ANEEL, a tipologia baixa renda tem a participação mais significativa do programa de eficiência energética, com investimentos de 2,85 bilhões de reais. O Gráfico 3 demonstra a divisão dos recursos do PEE até abril de 2016.

Figura 3 - Extratos por tipologias dos recursos advindos do PEE



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

No apêndice A é mostrada a tabela completa dos investimentos por tipologia do PEE.

A maior participação de projetos baixa renda se deve, fundamentalmente, à aplicação da Lei nº 12.212/2010, que trata a Tarifa Social de Energia Elétrica (TSEE) e determina a aplicação mínima de 60% dos recursos dos programas das concessionárias e permissionárias de distribuição de energia elétrica para unidades consumidoras beneficiadas pela TSEE [34].

Devido a essa obrigatoriedade as atenções das distribuidoras ficam muito voltadas a criação de novos formatos de projetos para aplicação a consumidores baixa renda, de forma a atender a maior demanda do programa de eficiência energética e otimizar os recursos.

2.2.4 Projeto de Tipologia Baixa Renda

A inserção da população baixa renda como cliente de uma empresa concessionária de energia elétrica precisa ter da concessionária uma política de comercialização diferenciada [36]. As principais causas do consumo elevado são o uso inadequado de energia elétrica, gerado pela falta de informação sobre o uso racional, uso de instalações elétricas precárias, a utilização

de refrigeradores em péssimo estado de conservação e as construções sem ventilação ou iluminação natural.

São considerados clientes baixa renda, perante a ANEEL, clientes que possuem cadastro na TSEE criada pela Lei Federal nº 10.438/2002, alterada pela Lei 12.212/2010 e regulamentada RN ANEEL nº431.

A TSEE é caracterizada por descontos nas tarifas aplicáveis a classe residencial. Para tal benefício os consumidores residenciais devem se enquadrar nos critérios de elegibilidade prevista na RN 414.

Fica claro que os consumidores que se enquadram na classe baixa renda são uma limitada parcela dos consumidores residenciais. Por isso, as discussões em torno da efetiva alocação de recursos do PEE, do ponto de vista da eficiência energética, são muitos. As determinações da lei de 2010 comprometem a efetividade do PEE, pois destina grande parte dos recursos para um setor que representa apenas 4% do consumo total de energia do país, reduzindo o direcionamento dos recursos para os principais consumidores, que são indústria e comércio [35]. Em contrapartida, se argumenta que os projetos voltados para o público de baixo poder aquisitivo focam na substituição de equipamentos e na adequação de instalações elétricas, o que diminui as perdas comerciais, dado que essas comunidades são responsáveis por grande parte das instalações clandestinas e incompatíveis com padrões técnicos. Logo, a regularização faz com que se diminua desperdícios e riscos de acidentes, além de melhorar a tarifação.

Afirma-se que a inserção da população baixa renda no mercado de uma empresa distribuidora de energia elétrica não pode ser concluída com a ligação das unidades e, conseqüentemente, emissão de faturas de energia, pois esses clientes sofrem os efeitos dos desequilíbrios sociais e econômicos diretamente [37].

Para confirmar tal vertente, é afirmado que o consumo sustentável de energia elétrica é aquele que contempla um valor de até 5% da renda familiar. Mas, em grande parte das famílias que tem renda familiar de até três salários mínimos, essa realidade é inexistente, o que provoca um alto nível de inadimplência [38]. Há ainda o fato de, por falta de condições financeiras, a maioria dessas famílias possuírem equipamentos com baixa eficiência, seja pelo tempo de uso ou pelo custo elevado dos equipamentos eficientes.

Nessa linha, geralmente os projetos voltados para as comunidades carentes contemplam ações educativas e ações técnicas. As ações técnicas são voltadas para melhoria da rede, instalação ou adequação de padrão de ligação, reformas elétricas internas e, com destaque, doação de equipamentos eficientes em substituição dos existentes [39].

Os projetos típicos voltados para essas comunidades contemplam, em grande maioria, lâmpadas e refrigeradores. Após a proibição da produção de lâmpadas incandescentes no país e depois de anos de operação de trocas de refrigeradores, fica cada vez mais raro existirem consumidores que ainda possuem lâmpadas incandescentes e refrigeradores obsoletos, fazendo com que o projeto caminhe para uma falta de opções. Nesse sentido, faz-se necessário que novos equipamentos e possibilidades sejam inseridos nesse contexto, a fim de manter os investimentos e fazer com que as concessionárias atendam as regulamentações.

Outros equipamentos são vistos como inviáveis tecnicamente, sejam pelo alto custo ou pelo baixo benefício. Não foram encontradas metodologias matemáticas que comprovem essa premissa. A fim de criar possibilidades e opções para projetos da tipologia baixa renda, alinhando a viabilidade técnica aos benefícios sociais, o estudo sugere uma metodologia de otimização de projetos, criando um estudo racional e não empírico para dimensionamento do quantitativo e determinação dos tipos de equipamentos a serem trocados.

2.3 PROCESSOS DE OTIMIZAÇÃO

Otimização refere-se aos conceitos, métodos e aplicações relacionadas a determinar a melhor solução, ou melhores soluções, para um dado problema [40]. Envolve o estudo das condições ótimas, desenvolvimento e análise de algoritmos, aplicações e experimentações computacionais.

Normalmente o objetivo da otimização é maximizar a eficiência de um projeto ou minimizar seu custo.

Por vezes, os problemas de otimização necessitam de um tempo computacional muito longo para que seja encontrada a melhor solução. Para esses tipos de problemas têm sido eficiente a aplicação de algoritmos heurísticos.

A palavra heurística é derivada do grego “heuriskein”, cujo significado é descobrir ou encontrar. Em otimização, a interpretação dessa palavra se refere a um método de busca de soluções em que não existe qualquer compromisso com o sucesso da solução ótima [41]. Geralmente encontram soluções de boa qualidade, com pouco esforço computacional, mas raramente encontram as soluções globais, principalmente em relação à sistemas reais ou de grande porte [42].

Os modelos heurísticos baseiam-se na execução de adições e remoções de reforços, de uma forma eficiente e analisando soluções interessantes do problema.

As heurísticas podem ser divididas em distintas vertentes, sendo elas construtivas, de melhoramento ou meta-heurísticas [43].

O algoritmo heurístico construtivo busca uma boa solução baseado em apenas uma escolha local. É iniciado de uma solução vazia e vai se construindo uma solução plena a partir de soluções parciais a cada passo da solução.

As heurísticas de melhoramento já são iniciadas com uma solução que obedece todas as restrições e condições do problema. À medida que se caminha nas iterações a solução inicial vai sendo melhorada, até que se encontre a solução ótima ou que o critério de parada seja atingido.

As meta-heurísticas são heurísticas aplicados a problemas complexos em que não se sabe precisar qual o algoritmo mais eficiente [43]. Meta-heurística é formada por duas palavras de origem grega: *meta* que do grego significa alto nível e *heuriskein* que do grego significa descobrir. Dessa forma, uma meta-heurística é um tipo de algoritmo exploratório inteligente onde técnicas de alto nível são aplicadas nos processos heurísticos.

Exemplos de meta-heurísticas são os algoritmos bioinspirados, que se baseiam na inteligência natural coletiva. São processos estocásticos que utilizam o comportamento da natureza ou processos biológicos para resolverem problemas de otimização. Geralmente são aplicados a projetos que possuem grande dimensão de espaço de soluções e que tem difícil solução [44].

- *Genetic Algorithms* ou Algoritmo Genético: é um ramo dos algoritmos evolucionários e pode ser definido como uma técnica de busca baseada numa metáfora do processo biológico de evolução natural. São técnicas de otimização global.

São inspirados nas características de evolução darwiniana de sistemas biológicos, utilizando soluções representadas por cromossomos.

É uma técnica de busca extremamente eficiente no seu objetivo de varrer o espaço de busca e encontrar soluções próximas da solução ótima, quase sem necessitar da interferência humana [45]. A desvantagem fica a cargo do tempo de processamento.

- *Bath Algorithm* ou Algoritmo de Morcego: é um algoritmo baseado na ecolocalização de morcegos [46]. Foi desenvolvido por Yang, em 2010, e verificou-se muito eficiente em diversas aplicações.

O algoritmo se baseia na capacidade dos morcegos de localizarem suas presas através da emissão de pulsos sonoros e recepção de ecos. Dessa forma, os morcegos podem vencer obstáculos para captura de suas presas mesmo estando na escuridão [43].

- *Firefly Algorithm* ou Algoritmo de Vagalumes: é um algoritmo baseado no comportamento de vagalumes tropicais [44]. De acordo com as características de atração, intensidade luminosa e dependência da distância, o algoritmo apresenta uma boa capacidade de lidar com problemas não lineares e de otimização multimodal.

- *Cuckoo Search* ou Algoritmo Cuco: é baseado no comportamento da ninhada de cucos [47]. É eficiente para comportamento de convergência, que pode ser comprovado utilizando teoria de probabilidade de Markov [43].

Outros dois exemplos de algoritmos bioinspirados são os aplicados para solução do problema proposto nesse trabalho. São eles:

- *Ant Colony Optimization*, ou Otimização por Colônia de Formigas, e;
- *Particle Swarm Optimization*, ou Otimização por Enxame de Partículas.

Esses dois métodos serão detalhados mais adiante.

2.3.1 *Ant Colony Optimization (ACO)*

A auto organização dos insetos necessita de uma comunicação entre eles. Esta interação pode ser direta, através de antenas, contatos de mandíbulas, visual ou químico, ou pode ser realizada de modo indireto, quando um indivíduo altera, temporariamente, o ambiente natural e o outro responde a essa modificação posteriormente. Esta forma indireta de comunicação é denominada estigmergia, que significa estímulo dos trabalhadores para melhorar o seu desempenho [48].

Estigmergia também é definido como o método de comunicação em que os indivíduos de um sistema interagem pela modificação do ambiente local [40].

As formigas são capazes de encontrar o caminho mais curto para uma fonte de alimento do formigueiro sem a utilização de dados visuais. Enquanto caminham, as formigas depositam no solo uma substância química chamada feromônio. Estas trilhas de feromônios podem ser percebidas por outras formigas e motivá-las a seguir aquele caminho. Isto significa que um movimento aleatório das formigas segue com maior probabilidade uma trilha de feromônio. À medida que as trilhas são reforçadas, mais e mais formigas seguirão aquela trilha [49].

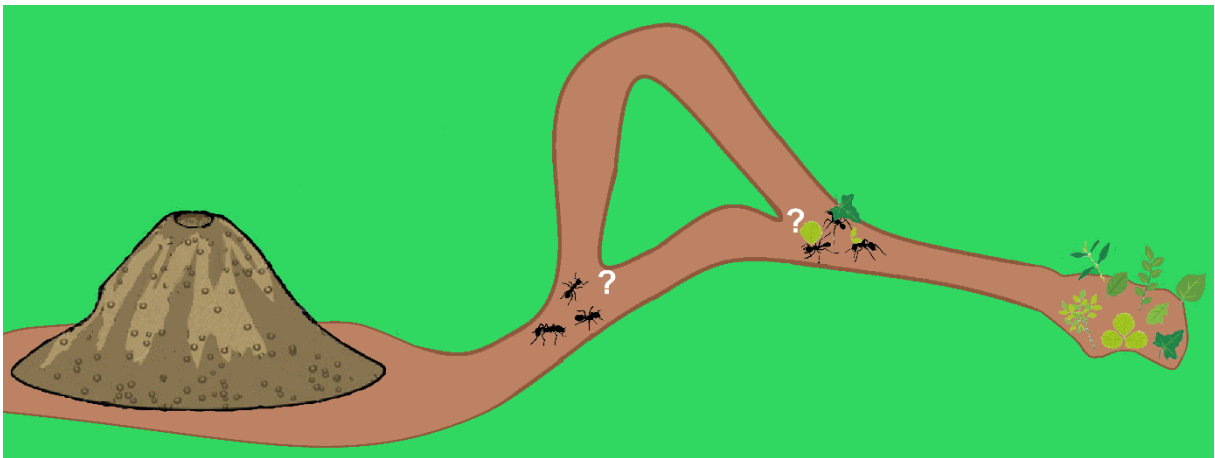
Esta comunicação indireta permite que seja encontrado o menor caminho entre a colônia e a fonte de alimento. As formigas são capazes de encontrar caminhos otimizados sem utilizar elementos visuais [48].

Baseado nesse comportamento real, o algoritmo de colônia de formigas foi criado em 1991 por Colorni, Dorigo e Maniezzo. A construção do algoritmo é baseado no comportamento da colônia de formigas e leva em consideração informações heurísticas e de feromônio, através de incrementos dinâmicos e probabilísticos. A solução inicial é calculada aleatoriamente. À medida que as formigas artificiais dão passos na construção da solução, faz-se um cálculo probabilístico baseado na quantidade de feromônio depositado naquela solução, de acordo com o objetivo do problema.

A ideia central do algoritmo é a comunicação indireta baseada em trilhas de feromônio entre as formigas. A trilha funciona como um tipo de informação numérica distribuída e modificada pelas formigas para refletir sua experiência quando da resolução de um problema [50].

As Figuras 1 e 2 exemplificam o processo de estigmergia. Na Figura 1 podemos perceber que há dois caminhos diferentes e aleatórios para as formigas saírem do formigueiro e chegarem até a fonte de comida.

Figura 4 - Ponte binária ligando o formigueiro à fonte de comida



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Na situação 1 da Figura 2 as formigas escolhem aleatoriamente um caminho para a fonte de comida. À medida que se deslocam as formigas vão modificando, temporariamente, o ambiente através do depósito de feromônio.

As formigas que escolhem o caminho mais curto depositam uma maior quantidade de feromônio naquele caminho, dado que passam por ele mais vezes. Na situação 2 da Figura 2 podemos perceber que, com o tempo, as formigas seguirão pelo caminho mais curto, dado a maior concentração de feromônio.

Vale destacar que algumas formigas continuarão seguindo o caminho mais longo. Isso ocorre porque existe um fator aleatório na decisão da formiga [51]. No entanto, a quantidade de formigas que escolhem o maior caminho diminui consideravelmente.

Figura 5 - Caminhos escolhidos pelas formigas após um determinado tempo



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

O algoritmo de colônia de formigas se baseia no depósito artificial de feromônio, que influencia o comportamento das formigas artificiais, chamadas de agentes. Cada formiga carrega em si uma solução para o problema e depositam maior quantidade de feromônio de acordo com a otimização do problema.

As características básicas do algoritmo são [48]:

- Retroalimentação positiva em função das trilhas de feromônio. Ou seja, quanto maior o nível de feromônio, melhor é a qualidade da solução;
- O feromônio artificial, cuja quantidade é acrescida nas soluções boas e decrescidas em soluções piores;
- O comportamento cooperativo das formigas, cuja exploração é coletiva;
- O reforço de feromônio nas trilhas das formigas que atingirem melhores desempenhos.

A Tabela 1 apresenta uma relação do que acontece na natureza e no algoritmo artificial [52].

Tabela 1 – Correspondência entre a natureza e o algoritmo artificial

NATUREZA	ACO
Possíveis caminhos entre o ninho e o alimento.	Conjunto de possíveis soluções.
Caminho mais curto.	Solução ótima.
Ação via comunicação por feromônio.	Procedimento de otimização.

Fonte: VIANA, F. A. C.; KOTINDA, G. I.; RADE, D. A.; STEFFEN JR., V., 2012

O algoritmo de colônia de formigas possui as seguintes características básicas [49]:

- É um algoritmo não-determinístico baseado em mecanismos presentes na natureza, isto é, no comportamento de formigas reais para a determinação de caminhos através de suas colônias para procura eficiente de fontes de comida;
- É um algoritmo paralelo e adaptativo, pois uma população de agentes move-se simultaneamente, de forma independente e sem um supervisor (não há um controle ou supervisão central);
- É um algoritmo cooperativo, pois cada agente (formiga) escolhe um caminho com base na informação (trilhas de feromônios) depositada por outros agentes que tenham selecionado previamente o mesmo caminho. Este comportamento cooperativo tem ingredientes de autocatálise (catálise provocada por feromônios que se formam no próprio sistema reativo), isto é, o ACO providencia uma realimentação positiva desde que a probabilidade de um agente escolher o caminho aumenta com o número de agentes que escolheu previamente aquele caminho.

A meta-heurística de otimização de colônia de formigas pode ser aplicado a qualquer problema de otimização para o qual pode-se definir um algoritmo construtivo [53].

O processo de busca do algoritmo se baseia em quatro passos [54]:

- Obter o valor numérico da função objetivo para cada solução associando um mérito chamado feromônio. Portanto, ao final do processo de busca, a melhor solução terá a maior quantidade de feromônio;
- Sortear uma nova colônia baseada na quantidade total de feromônio existente;
- Voltar ao primeiro passo;
- O processo termina quando um determinado pré-requisito for alcançado.

Geralmente o número de iterações ou um erro pré-determinado entre as iterações.

Podemos demonstrar a formulação geral matemática do algoritmo de colônia de formigas baseado em uma população de m formigas. Seja k uma formiga genérica. A probabilidade que a k -ésima formiga atribua a facilidade j para localização i é dada por:

$$p_{ij}^k(t) \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{ij}]^\beta}{\sum [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{ij}]^\beta}; \text{ para todo } k > 0 \\ 0; \text{ outros casos} \end{cases} \quad (1)$$

Sendo os termos de (1) definidos por:

- $p(t)$ é a probabilidade da formiga seguir por uma trilha
- τ é o acúmulo de feromônio
- α é um valor de projeto heurístico

- β é um valor de projeto heurístico
 μ é a visibilidade entre j e i

Ao longo da trilha de i até j a formiga deposita na trilha a quantidade de feromônio definida por:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t+n) \begin{cases} \frac{Q}{L_k}; \text{ se } k - \text{ésima formiga usa a trilha } (i,j) \\ 0; \text{ outros casos} \end{cases} \quad (2)$$

Sendo os termos de (2) definidos por:

- $\Delta\tau$ é o depósito de feromônio por formiga na trilha
 Q é uma constante de projeto
 L é o comprimento do caminho da formiga aleatória

L é avaliado quando a formiga completa o caminho. Consiste em um ciclo de n iterações. Este valor é utilizado para atualizar a quantidade de feromônio depositada previamente na trilha, de acordo com a equação (3).

$$\tau_{ij}^k(t+n) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}^k + \Delta\tau_{ij}^k \quad (3)$$

Sendo os termos de (3) definidos por:

- t é o tempo
 ρ é o coeficiente de evaporação do feromônio

O valor $(1-\rho)$ representa a taxa de persistência do feromônio da trilha entre o tempo t e $(t+n)$, onde:

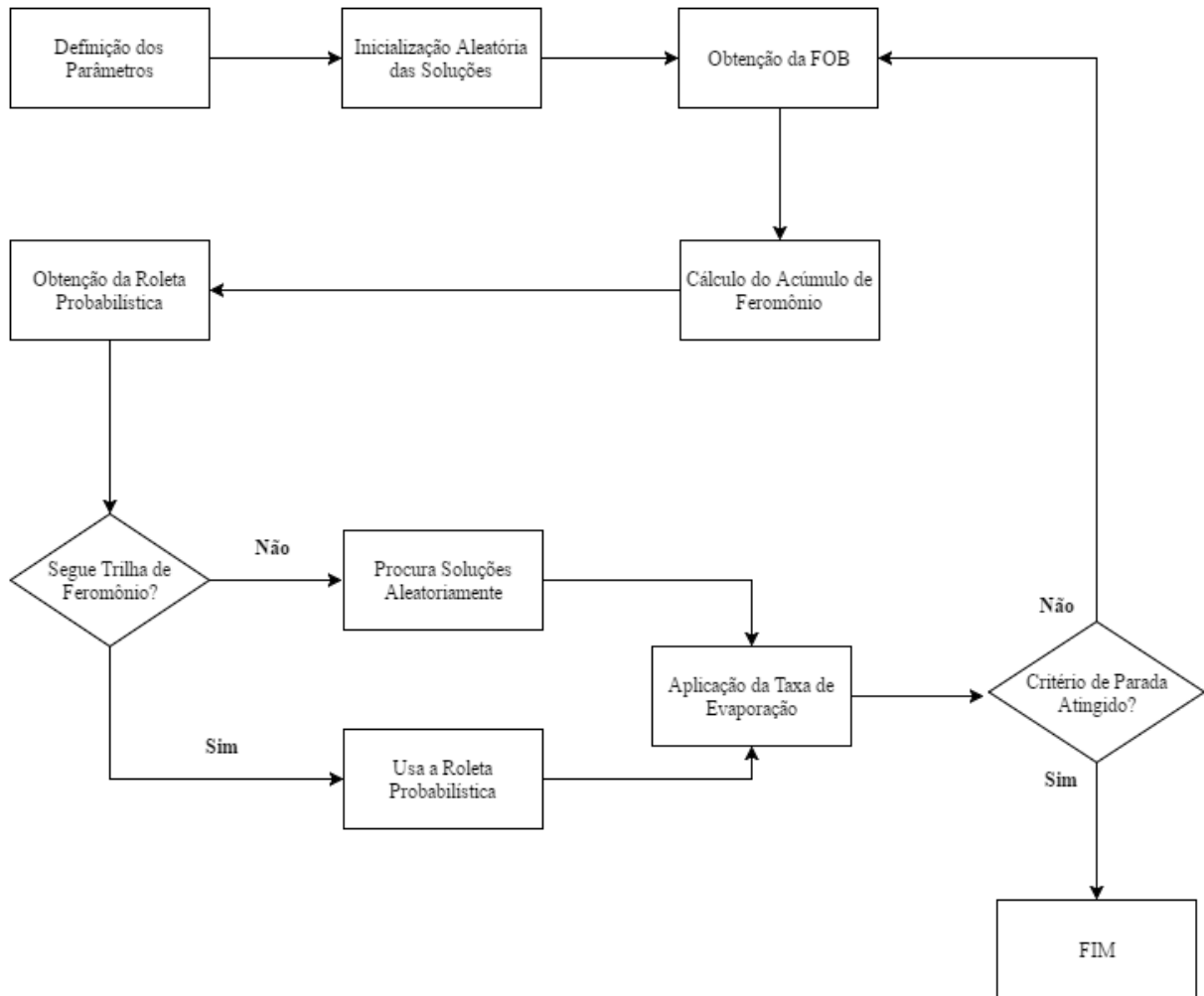
$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \tau_{ij}^k \quad (4)$$

Sendo os termos de (4) definidos por:

- m é o número de formigas

A Figura 3 e o Quadro 1 mostram, respectivamente, um fluxograma do algoritmo básico do ACO e o pseudocódigo do ACO [48].

Figura 6 – Fluxograma básico do ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 7 – Pseudocódigo do ACO

Pseudocódigo do Algoritmo de Colônia de Formigas
Início do Algoritmo
Iniciar Parâmetros, Iniciar Rastro de Feromônio
Agendar Atividades
Construção de Soluções
Atualização de Feromônio
Ações Globais (Opcional)
Fim Agendar Atividades
Fim do Algoritmo

Fonte: DORIGO, M.; STUTZLE, T., 2004

Nesse formato, o algoritmo de colônia de formigas foi aplicado à otimização da relação custo benefício de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda. A aplicação é detalhada no Capítulo 3.

2.3.2 Particle Swarm Optimization (PSO)

O PSO foi desenvolvido por Kennedy e Eberhart baseado nos estudos do sócio biologista Edward Osborne Wilson [55]. Semelhante ao ACO, o PSO também é um procedimento de otimização estocástico inspirado em princípios de cooperação e comportamento em sociedade por enxames: cardume de peixes ou bandos de aves. O algoritmo se popularizou rapidamente como otimizador global, devido sua eficiência e custo operacional.

Assim como as outras abordagens de inteligência coletiva, o PSO é baseado em uma população de indivíduos capazes de interagir entre si e com o meio ambiente. Com base nas propriedades de auto avaliação, comparação e imitação, os indivíduos são capazes de lidar com um número de possíveis situações que o ambiente lhes apresenta. Os comportamentos globais serão resultados emergentes dessas interações [56].

O PSO se baseia nas regras implícitas seguidas por membros de bando de pássaros e cardumes, que os habilitam a se moverem de forma sincronizada, sem colisão, resultando em uma coreografia surpreendente [57].

O movimento é resultante do comportamento dos seus indivíduos nos seus esforços para manter uma distância ótima de cada um de seus vizinhos individuais [58].

Os indivíduos de uma organização em enxames se baseiam em três regras básicas [59]:

- Avaliação – os indivíduos são capazes de avaliar a situação atual em que se encontram e suas experiências;
- Comparação – os indivíduos são capazes de comparar suas próprias experiências e a de seus vizinhos;
- Imitação – se baseia na comparação das experiências do grupo. Os indivíduos imitam os vizinhos que obtiverem as melhores experiências.

Quando um grupo de agentes coopera para atingir um propósito ou algum objetivo comum, um tipo de auto-organização emerge das ações realizadas por esse grupo [60]. Essa inteligência coletiva aparece frequentemente em grandes grupos ou coleções de agentes simples como bandos de pássaros, cardumes de peixes, enxames de insetos. Os agentes usam simples

regras locais para governar suas ações e interagir com os demais membros do grupo, dessa forma a coleção de agentes atinge seus objetivos.

Um agente autônomo é um subsistema que interage com o ambiente, que normalmente engloba outros agentes, mas atuando de forma independente. O agente autônomo não segue os comandos de um líder ou algum plano global. Por exemplo: para um pássaro participar de um bando ele somente ajusta seus movimentos para coordená-los com o movimento do bando, tipicamente como se comportam seus vizinhos mais próximos. Um pássaro em um bando simplesmente tenta evitar a colisão. Um ambiente de bando ajuda os pássaros a terem vantagens sobre diversos aspectos, incluindo proteção contra predadores (especialmente para pássaros no meio do bando) e busca de alimento (essencialmente cada pássaro tem sua visão expandida pelos olhos de cada um dos demais pássaros do bando) [61].

No algoritmo PSO os indivíduos são representados por pontos denominados partículas, que percorrem um determinado espaço de busca com dimensão que varia de acordo com as quantidades variáveis associadas ao problema [62]. Portanto, a posição de cada partícula no espaço de busca define a movimentação desta e a influência dela no movimento de suas vizinhas. O conjunto das partículas é chamado de enxame.

Cada partícula é uma solução candidata sendo representada por sua posição (x_i) e por sua velocidade (v_i) atual, além da melhor posição visitada até o momento ($P_{best,i}$) [63].

Nesse método computacional de otimização o sistema é inicializado aleatoriamente com uma população de partículas, tendo cada uma atribuída a si uma velocidade aleatória. Cada partícula apresenta o seu próprio potencial de solução para o problema proposto [64].

A posição representa um conjunto de coordenadas cartesianas que descrevem um ponto do espaço de busca. A cada iteração a posição corrente é avaliada como uma solução do problema. Se a solução encontrada é melhor que outra solução já encontrada, então ela substituirá o valor armazenado em P_{best} .

Cada partícula é membro de uma vizinhança social e a influência social é resultado da observação de seus vizinhos. Nesse sentido, a partícula será afetada pelo melhor ponto encontrado por qualquer membro da sua vizinhança topológica. A melhor posição encontrada pelos indivíduos com os quais a partícula mantém ligações é armazenada em G_{best} [65]. A cada iteração o algoritmo atualiza as velocidades das partículas de acordo com as variáveis envolvidas e as melhores posições encontradas [66].

Na topologia *Global Best* de vizinhança a trajetória de cada partícula individual é influenciada pela melhor posição de toda a população. Todas as partículas são atraídas simultaneamente para a melhor parte do espaço de busca. Entretanto, se o ótimo global não está

perto da melhor solução, pode ser impossível que as partículas explorem outras áreas e, conseqüentemente, podem ficar presas a um ótimo local [67].

A evolução das partículas é através da velocidade, que é definida como um vetor dentro do espaço de busca. A cada intervalo de tempo a velocidade é atualizada e uma nova posição da partícula é calculada em função da posição atual e da nova velocidade calculada [68].

O algoritmo PSO é representado, matematicamente, por duas equações básicas que estão mostradas em (5) e (6):

$$v_i(t + 1) = \omega \cdot v_i(t) + \varphi_1 \cdot r_1 \cdot (P_{best,i} - x_i) + \varphi_2 \cdot r_2 \cdot (G_{best,i} - x_i) \quad (5)$$

$$x_i(t + 1) = x_i(t) + v_i(t + 1) \cdot \Delta P \quad (6)$$

Sendo os termos de (5) e (6) definidos por:

- v é a velocidade da partícula
- x é a posição da partícula
- ω é o peso de inércia
- φ são valores de aceleração das partículas
- r são valores randômicos para ajuste do algoritmo
- $P_{best,i}$ é a melhor posição individual da partícula
- $G_{best,i}$ é a melhor posição do enxame
- ΔP é o passo de iteração

Sendo que ω , φ_1 e φ_2 são o peso de inércia e constantes de aceleração das partículas na direção de $P_{best,i}$ e $G_{best,i}$, respectivamente, e r_1 e r_2 são constantes aleatórias.

O peso da inércia ω é empregado para controlar o impacto do histórico prévio de velocidades no valor da velocidade corrente, que é determinante no tipo de exploração executada pela partícula. Um alto valor de peso inercial facilita a exploração global (busca de novas áreas) enquanto um valor pequeno de peso inercial tende a facilitar a exploração local, realizando uma busca detalhada em uma determinada área. A seleção de valor adequado do peso da inércia pode fornecer um equilíbrio entre as necessidades de exploração global e local e dessa forma reduzir o número médio de iterações para localização do ótimo [60]. Este valor pode variar linearmente de um alto valor para um baixo valor, de forma que a busca seja global no início e local no final do procedimento. Estudos recentes apontam para fixação do valor do peso de inércia em torno de 0,5 [69].

Os valores dos parâmetros randômicos, que ponderam a interferência cognitiva social e cognitiva individual em cada etapa do processo, podem ser definidos de diversas formas

[70]. Alguns estudos apontam que valores dos parâmetros iguais a 0,5 levam a bons resultados [58]. Outros estudos recomendam que os valores sejam iguais a um ou que a soma dos valores seja igual a quatro [71]. Há ainda estudos que mostram a preferência pelo uso de valores de parâmetro cognitivo individual maior que o parâmetro cognitivo social, de tal forma que a soma seja sempre menor ou igual a quatro [72].

Vale ressaltar que a velocidade das partículas em cada dimensão são limitadas a um valor máximo. A velocidade máxima é importante pois determina a resolução que a região próxima a soluções atuais são procuradas. Se a velocidade máxima é alta o PSO facilita a busca global. Se o valor máximo é baixo enfatiza as buscas locais [73]. Em relação ao valor máximo da velocidade, é sugerido em [71] que o valor seja limitado a $(X_{máx} - X_{mín})$ para cada partícula. A cada iteração a velocidade máxima deve ser limitada a esse valor.

A Figura 4 e o Quadro 2 mostram, respectivamente, um fluxograma do algoritmo básico do PSO e o pseudocódigo do PSO para a tipologia *Global Best* de vizinhança [73].

Figura 8 – Fluxograma básico do PSO

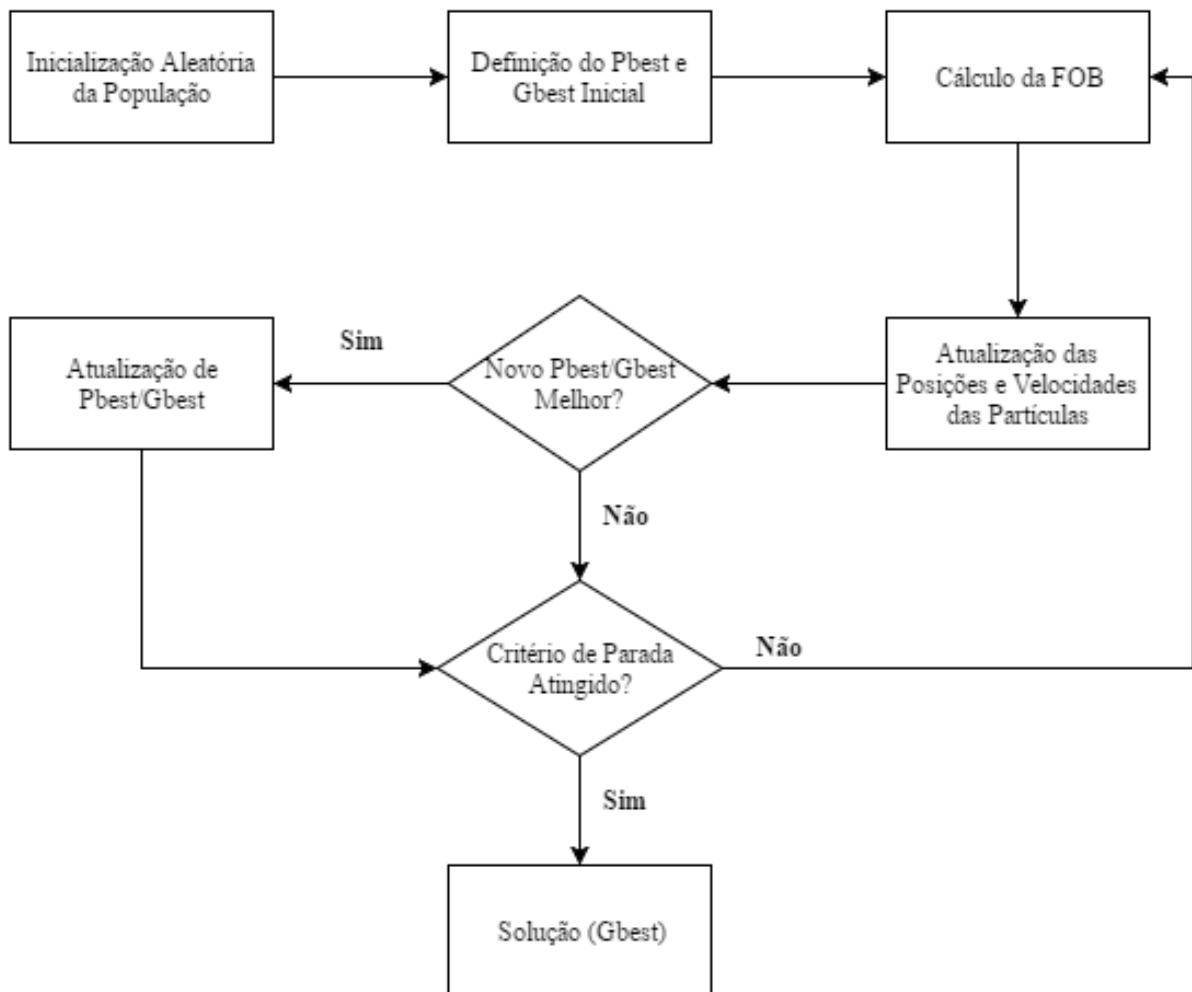


Figura 9 – Pseudocódigo do PSO

PseudoCódigo do Algoritmo de Enxame de Partículas
<p>Início do Algoritmo</p> <p style="padding-left: 40px;">$t = 1;$</p> <p style="padding-left: 40px;">Gera a população inicial de partículas</p> <p style="padding-left: 40px;">Faça $j = 1$ a N; N: dimensão do problema</p> <p style="padding-left: 80px;">Faça $i = 1$ a n_{pop}</p> <p style="padding-left: 120px;">$x_{i,j}(t) = \text{Gera aleatório} \in [\text{limite}_{\min}, \text{limite}_{\max}];$</p> <p style="padding-left: 120px;">$v_{i,j}(t) = \text{Gera aleatório} \in [v_{\min}, v_{\max}];$</p> <p style="padding-left: 80px;">Fim Faça i</p> <p style="padding-left: 120px;">$f(t) = \text{Avalia}(x_i(t)); \text{minimização}$</p> <p style="padding-left: 40px;">Fim Faça j</p> <p style="padding-left: 40px;">Faça $t = 1$ a máximo de gerações (t_{\max})</p> <p style="padding-left: 80px;">$p_{best,i} = x_i(t); \text{melhor da posição } i$</p> <p style="padding-left: 80px;">$g_{best} = x_{\text{melhor}}(t); \text{melhor posição da população}$</p> <p style="padding-left: 40px;">Faça $i = 1$ a n_{pop}</p> <p style="padding-left: 80px;">Calcula $x_i(t+1)$ e $v_i(t+1)$, $i = 1, n_{pop}$</p> <p style="padding-left: 120px;">$f_i(t+1) = \text{Avalia}(x_i(t+1));$</p> <p style="padding-left: 120px;">se $f_i(t+1) < f(p_{best,i})$ então $p_{best,i} = x_i(t+1);$</p> <p style="padding-left: 120px;">se $f_i(t+1) < f(g_{best})$ então $g_{best} = x_i(t+1);$</p> <p style="padding-left: 40px;">Fim Faça i</p> <p style="padding-left: 80px;">$t = t + 1$</p> <p style="padding-left: 40px;">Fim Faça t</p> <p>Fim do Algoritmo</p> <p>Melhor solução do algoritmo PSO: g_{best}</p>

Fonte: AYALA, H. V. H.; COELHO, L. S., 2007

Nesse formato, o algoritmo de enxame de partículas foi aplicado a otimização da relação custo benefício de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda. A aplicação é detalhada no Capítulo 3.

2.4 CONCLUSÕES

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de eficiência energética com ênfase no programa de eficiência energética da ANEEL. Foram apresentados os conceitos qualitativos e as características dos programas, assim como as regras regulatórias do órgão regulador para as concessionárias.

Foram apresentados um resumo das características dos principais algoritmos heurísticos construtivos conhecidos na literatura e uma expansão de conceitos e formulação dos algoritmos que serão aplicados para estudo do problema. Apesar de não encontrarem soluções ótimas globais, os algoritmos meta-heurísticos são importantes e relevantes para compreensão de problemas, com baixo esforço computacional. Além disso, são ótimas escolhas para a aplicação lógica computacional em um problema que é resolvido, na atualidade, empiricamente.

Os algoritmos podem ainda ser adotados para a formação de uma ideia inicial de projeto para ser aplicado no dimensionamento das concessionárias.

3 FORMULAÇÃO MATEMÁTICA DO PROBLEMA PROPOSTO

3.1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse capítulo é abordar a metodologia utilizada nesse trabalho, explicando matematicamente o problema e propondo soluções.

O presente estudo apresenta a formulação de cálculo da relação custo benefício dos projetos de tipologia baixa renda de eficiência energética, como se calcula e quais os parâmetros importantes para formulação.

Em seguida são apresentadas duas metodologias de otimização para a relação custo benefício, o *Ant Colony Optimization* e o *Particle Swarm Optimization*. Ambos terão seus algoritmos adaptados para resolver o problema do quantitativo ótimo de equipamentos a serem empregados nos projetos desse tipo.

As metodologias propostas na dissertação criam uma lógica computacional para a construção dos projetos de eficiência energética, visto que a única metodologia encontrada na pesquisa desse trabalho, para dimensionamento desses projetos pelas concessionárias e seus prestadores de serviço, é a metodologia empírica. Além de otimizar o indicador de viabilidade técnica dos projetos, dentro dos limites dos investimentos previstos no PEE, o estudo modifica a forma como os projetos podem ser pensados e executados pelas concessionárias.

3.2 RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO (RCB)

A seleção de projetos é tarefa complexa, que demanda dos gestores e empresários a análise de diversos cenários e variáveis para selecionar os mais rentáveis, definindo onde irão aplicar os recursos financeiros organizacionais ou próprios.

A escassez de recursos impossibilita o aproveitamento de todas as oportunidades existentes para aplicação de capital [74]. Um dos problemas do empresário é decidir por uma entre as inúmeras alternativas de investimento disponíveis, a fim de obter a maximização dos lucros ou dos resultados técnicos do investimento.

São muitos os métodos usados para a avaliação de opções de investimentos, desde os mais simples até aqueles que envolvem sofisticados modelos matemáticos. Todos eles obedecem a um mesmo princípio: a equivalência entre os fluxos de caixa utilizando uma taxa de desconto. Essa taxa é denominada taxa mínima de atratividade, definida como aquela que representa a rentabilidade mínima aceitável de um investimento [75].

Dentre os mais conhecidos no mercado para tomada de decisão de um investimento, podemos citar o método do tempo de retorno do investimento, ou *payback*, o método do Valor Presente Líquido (VPL) e o método da Taxa Interna de Retorno (TIR).

Para avaliação de projetos de eficiência energética são utilizados frequentemente o método do valor presente líquido, do valor anual uniforme, do tempo de retorno de capital e da taxa interna de retorno [76]. As diversas técnicas apresentam certas vantagens e desvantagens quando comparadas entre si, devendo sempre ser aplicadas conhecendo as suas limitações. Nos exemplos de aplicação em problemas envolvendo questões energéticas, na maioria dos casos, as séries serão consideradas uniformes. Não sendo uniformes deve-se modelar os problemas reais como séries uniformes, visto que os benefícios de projetos energéticos são iguais no período anual.

Além das metodologias já descritas, ainda é indicado como metodologias de avaliação de projetos excludentes o Índice de Lucratividade (IL), a Taxa Interna de Retorno Modificada (TIRM) e o Valor Anual Equivalente (VAE) [77]. O IL compreende a relação entre o VPL do projeto e o valor presente dos desembolsos desse projeto. A TIRM considera a reaplicação dos fluxos de caixa de ingresso ao custo de capital (taxa real de mercado) e os fluxos de caixa de desembolso devem ser trazidos ao momento inicial pelo custo do capital. Finalmente, o VAE possibilita comparar projetos mutuamente excludentes e com vida útil diferenciada, a partir da distribuição uniforme do VPL entre os anos de vigência do investimento, demonstrados matematicamente por (7).

$$VAE = \frac{VPL \cdot i}{1 - (1 + i)^n} \quad (7)$$

Sendo os termos de (7):

VAE é o valor anual equivalente

VPL é o valor presente líquido

i é a taxa de desconto

n é o número de anos do investimento

O método da relação custo benefício é o mais utilizado para avaliar a viabilidade econômica dos projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda [20]. O indicador citado é o único parâmetro considerado pela ANEEL para o aceite ou não dos projetos de eficiência energética do PEE.

O RCB é definido como a relação entre o total de despesas e o total de receitas de um negócio [1]. Para os projetos de eficiência energética, cujo objetivo é de economizar energia

(MWh/ano) e reduzir a demanda de energia na ponta (kW), deve-se calcular o RCB para avaliar a viabilidade econômica do projeto.

A ANEEL ainda diferencia o cálculo de RCB para projetos anuais e plurianuais, além de determinar o mínimo valor de investimento anual, sendo de 0,5% da receita operacional líquida da concessionária onde serão realizados os projetos. E ainda, no mínimo, 60% do total reservado para projetos de eficiência energética devem ser direcionados para projetos de tipologia baixa renda. Os valores de custo serão fixados de acordo com esses valores regulatórios.

Os projetos que compõem os programas anuais de eficiência energética são realizados de acordo com os regulamentos e procedimentos definidos no PROPEE. Na prática, seguem controles de formulação e apresentação para aprovação prévia pela ANEEL e posterior implementação.

Para aprovação são utilizados índices técnicos específicos para cada tipo de projeto ou ação. Um desses índices é a relação entre o custo de implementação do projeto de eficiência energética em análise e o benefício correspondente a energia economizada e redução de demanda na ponta, sendo aceito se for mais viável que investir recursos na expansão do sistema elétrico atual.

É definido que todos os projetos devem ter sua RCB calculada sob a ótica da sociedade [78]. Se um projeto tiver mais de um uso final (iluminação, refrigeração, etc.), cada um desses deverá ter a RCB calculada separadamente. Deverá ainda ser apresentada a RCB global do projeto pela média ponderada das RCBs individuais. Os pesos serão definidos por participação percentual da energia economizada em cada uso final.

Essa relação entre custo e benefício é o indicador mais importante e deve ser menor ou igual a 0,8. Quanto menor este valor, melhor é o projeto para a sociedade [26].

A racionalidade matemática do máximo RCB aceitável para projetos de eficiência energética consiste em saber se o benefício auferido é maior que aquele que haveria se o recurso do projeto tivesse sido empregado na expansão do sistema elétrico. Dessa forma, considera-se que o benefício apurado com a valoração da energia e da demanda reduzidas ao custo unitário marginal de expansão do sistema deve ser, no mínimo, 25% maior que o custo do projeto. Matematicamente a relação custo benefício do projeto deve ser igual ou inferior a 0,8 [26].

O percentual adicional, ou seja os 25% adicionais, são considerados para fazer frente ao maior risco percebido pela sociedade às ações de eficiência energética em relação às de expansão do sistema elétrico. Podemos concluir que à medida que os projetos de eficiência

energética ganham credibilidade essa margem de segurança poderá ser reduzida, fazendo com que o RCB possa ter valor igual a um.

3.3 CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO

O cálculo do RCB é feito de acordo com cada uso final do projeto ponderado pelo custo de cada equipamento, resultando no cálculo do RCB global. O cálculo do RCB global é a relação entre o Custo Total do investimento (CA_t) e o Benefício Total advindo do projeto em termos energéticos (BA_t). A fórmula básica do RCB para um projeto anual é mostrada em (8).

$$RCB = \frac{CA_t}{BA_t} \quad (8)$$

Sendo os termos de (8):

RCB é a relação custo benefício

CA_t é o custo anualizado, em R\$

BA_t é o benefício anualizado, em R\$

3.3.1 Cálculo do Custo Anualizado (CA_t)

O Custo Anualizado do projeto (CA_t) representa o valor de investimento anual das empresas no projeto em questão. O custo é composto pelos valores de compra de equipamentos assim como todos os serviços que devem ser realizados: descarte dos materiais, medição e verificação dos benefícios energéticos do projeto, transporte, marketing, auditoria contábil e mão de obra da concessionária e das contratadas para execução do projeto.

O Custo Anualizado do projeto (CA_t) é o somatório dos Custos Anualizados de cada Equipamento (CA_n) e custos relacionados, como mão de obra e custos de instalação. O equacionamento é mostrado em (9).

$$CA_t = \sum_n CA_n \quad (9)$$

Sendo os termos de (9):

CA_n é o custo anualizado de cada equipamentos, em R\$

O custo anualizado de cada equipamento é o produto do Custo de cada Equipamento (CE_n), pela ponderação do Custo Total do projeto (CT) e do Custo Total em Equipamentos (CE_t), ou seja, do custo apenas com a compra dos materiais que serão substituídos no projeto,

multiplicado pelo Fator de Recuperação de Capital (FRC_u). A equação do custo anualizado de cada equipamento é mostrada em (10).

$$CA_n = CE_n \cdot \frac{CT}{CE_t} \cdot FRC_u \quad (10)$$

Sendo os termos de (10):

FRC é o fator de recuperação de capital

CE é o custo por equipamento, por ano

CT é o custo total do projeto

O CE_t e o FRC_u são formulados por (11) e (12), respectivamente.

$$CE_t = \sum_n CE_n \quad (11)$$

$$FRC_u = \frac{i \cdot (1 + i)^u}{(1 + i)^u - 1} \quad (12)$$

Sendo os termos de (12):

i é a taxa de desconto

u é tempo de vida útil dos equipamentos

Onde i representa a taxa de desconto especificada no Plano Nacional de Energia vigente na data de submissão do projeto, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética.

O fator de recuperação de capital de um investimento é o valor esperado futuro que o investidor pretende obter quando faz um investimento [77].

3.3.2 Cálculo do Benefício Anualizado (BA_t)

O benefício anualizado do projeto representa, em termos financeiros, o retorno técnico de eficiência energética dos projetos do PEE. Esse valor é calculado pela soma do produto da Energia Economizada (EE) pelo valor do Custo Unitário da Energia Economizada (CEE) com o produto da Redução de Demanda na Ponta (RDP) pelo Custo Unitário da Demanda Evitada (CED).

Conceitua-se como custos evitados em decorrência da implantação de um projeto de incremento de eficiência energética, com intervenções em um segmento existente ou em unidades consumidoras, a economia anual proporcionada nos custos do sistema a montante do

segmento considerado através da postergação de investimentos (custo da demanda evitada) ou da redução de despesas operacionais (custo da energia evitada) [78].

O BA_t é calculado de acordo com (13).

$$BA_t = (EE \cdot CEE) + (RDP \cdot CED) \quad (13)$$

Sendo os termos de (13):

CEE é custo da energia economizada

EE é o valor de energia economizada

CED é o custo evitado de demanda

RDP é o valor de redução de demanda na ponta

Um bom método para determinação do custo unitário evitado de um certo segmento é o de se adotar os mesmos custos para suprir uma unidade consumidora conectada ao mesmo segmento, pois é indiferente se a demanda passante destina-se ao suprimento de perdas ou dos consumidores. Na determinação deste custo tem-se usado a teoria marginalista de custo [79].

De acordo com a teoria marginalista, os custos (de demanda e de energia) para o atendimento de uma unidade consumidora conectada a um determinado nível de tensão, são os incorridos em todo o sistema eletricamente a montante da unidade consumidora, inclusive do segmento onde a unidade consumidora se encontra ligado.

Os custos em um determinado segmento de um sistema elétrico serão sempre aqueles apurados nos níveis de tensões imediatamente superiores ao mesmo.

Dessa forma, foi adotado a única alternativa conhecida no setor: o modelo de cálculo contido no relatório CODI – 3.2.19.34.0. Esse modelo utiliza a tarifa hora-sazonal azul como base para se estabelecer o custo evitado.

Apesar do relatório ser baseado nos custos unitários de perdas técnicas do sistema, é indiferente se o custo é de perdas ou de consumidores, sendo válida a aplicação do método para o cálculo [79].

Os cálculos do Custo Unitário Evitado da Demanda (CED) e do Custo Unitário da Energia (CEE) são calculados de acordo com (14) e (15), respectivamente.

$$CED = (12 \cdot C_1) + (12 \cdot C_2 \cdot LP) \quad (14)$$

$$CEE = \frac{(C_3 \cdot LE_1) + (C_4 \cdot LE_2) + (C_5 \cdot LE_3) + (C_6 \cdot LE_4)}{LE_1 + LE_2 + LE_3 + LE_4} \quad (15)$$

Sendo os termos de (14) e (15):

C_n são os custos unitários de demanda e de energia

LE_n são as constantes de perda de energia

Os valores C_1 e C_2 são, respectivamente, os valores do custo unitário da demanda no horário de ponta e no horário fora de ponta, e devem ser adotados os valores de precificação para unidades consumidoras do segmento [80].

Os valores C_3 , C_4 , C_5 e C_6 são, respectivamente, os valores do custo unitário de energia no horário de ponta de período seco, no horário de ponta de período úmido, no horário fora de ponta de período seco e no horário fora de ponta de período úmido, e devem ser adotados os valores de precificação para unidades consumidoras do segmento [80].

A constante LP é a constante de perda de demanda no posto fora de ponta, considerando 1kW de perda de demanda no horário de ponta [26].

As constantes LE_1 , LE_2 , LE_3 e LE_4 são constantes de perdas de energia, respectivamente, no posto de ponta de períodos secos, no posto de ponta de períodos úmidos, no posto de fora de ponta de períodos secos e no posto de fora de ponta de períodos úmidos. Todos considerando 1kW de perda de demanda.

Para as empresas que já possuem sistema de bandeiras tarifárias de energia, conforme Procedimentos de Regulação Tarifária (PRORET), também será adotada a modalidade tarifária azul. O CED será calculado conforme (14). Já o CEE será calculado de acordo com (16).

$$CEE = \frac{C_p \cdot LE_p + C_{fp} \cdot LE_{fp}}{LE_p + LE_{fp}} \quad (16)$$

Sendo os termos de (16):

C_p é o custo unitário de energia na ponta

C_{fp} é o custo unitário de energia fora de ponta

LE_p é a constante de perda de energia na ponta

LE_{fp} é a constante de perda de energia fora de ponta

Os valores C_p e C_{fp} são os valores do custo unitário da energia, respectivamente, no horário de ponta e no horário fora de ponta, na bandeira verde.

Os valores LE_p e LE_{fp} são constantes que representam perda de energia no posto, respectivamente, de ponta e fora de ponta, considerando 1kW de perda de demanda. Esses valores são calculados de acordo com o relatório da ABRADDEE e como mostrado em (17) e (18).

$$LE_p = \frac{7 \cdot LE_1 + 5 \cdot LE_2}{12} \quad (17)$$

$$LE_{fp} = \frac{7 \cdot LE_3 + 5 \cdot LE_4}{12} \quad (18)$$

Pode-se ver que os valores das constantes LE_p e LE_{fp} são ponderados de acordo com o comportamento histórico climático do Brasil, sendo considerado que 7 meses do ano temos períodos secos e 5 meses do ano temos períodos úmidos.

Os valores energéticos previstos em (13) são os valores técnicos de Energia Economizada (EE) e de Redução de Demanda no horário de Ponta (RDP). Esses valores dependem de cada equipamento previsto no projeto, indiretamente, através do tempo de vida útil ($t_{\text{útil}}$) para cálculo total dos benefícios da substituição dos equipamentos, do quantitativo de equipamentos empregados no projetos (qtd_n) e, no caso da RDP, do Fator de Coincidência na Ponta (FCP_n) na utilização dos equipamentos.

Vale destacar que o fator de coincidência na ponta pode ser definido como a fração de unidades que são assumidas como em operação durante o horário de ponta da concessionária responsável pelo projeto [81].

Os valores de Energia Economizada por equipamento (EE_n) depende diretamente da potência de cada equipamento utilizado e do tempo de utilização médio. Os valores recomendados são os dos estudos e relatórios do Procel para o cálculo. O valor é calculado pelo produto da diferença entre as potências dos equipamentos antigos e dos equipamentos eficientes com o tempo médio de utilização do equipamento.

Os valores de Energia Economizada (EE) anual e o valor de Redução da Demanda na Ponta (RDP) são calculados por (19) e (20), respectivamente.

$$EE = \sum_n t_{\text{útil}_n} \cdot EE_n \cdot qtd_n \cdot 10^{-6} \quad (19)$$

Sendo os termos de (19):

qtd é a quantidade de equipamentos

$t_{\text{útil}}$ é o tempo de utilização dos equipamentos

$$RDP = \sum_n EE_n \cdot qtd_n \cdot FCP_n \cdot 10^{-3} \quad (20)$$

Sendo os termos de (20):

FCP é o fator de coincidência na ponta

Todos os cálculos se baseiam no relatório CODI 19 – 34 e no racional de que a energia e demanda evitadas correspondem a uma redução de perdas no sistema, sendo o benefício de evitar uma unidade de perdas numericamente igual ao custo de fornecer uma unidade adicional de carga [26].

O cálculo dos custos unitários de energia se baseiam no impacto para o sistema da carga evitada, supondo-se um perfil de carga típico, que é caracterizado pelo fator de carga (F_c).

O fator de carga é a relação entre a demanda média, em kW, e a demanda máxima, em kW, ao longo de um período de tempo. Sendo que esses parâmetros são medidos nas subestações, normalmente [81].

O fator de carga influencia no comportamento das perdas evitadas do sistema através do valor de LP , diretamente e indiretamente, através do valor do fator de perda (F_p), que modifica o valor das constantes que representam cada posto horário.

O fator de perda é a relação entre a perda de demanda média, em kW, e a perda de demanda máxima, em kW, ao longo de um período de tempo. Alguns autores consideram como fator de carga de perda [83].

O fator de perdas anual é obtido com a composição completa das curvas de carga de dias úteis, fim de semana e feriados. Quando não se possui esses dados, é comum o uso deste fator por meio de (21) [83].

$$F_p = k \cdot F_c + (1 - k) \cdot F_c^2 \quad (21)$$

Sendo os termos de (21):

F_p é o fator de perdas

k é uma constante de proporcionalidade do sistema

F_c é o fator de carga

O valor de k é um parâmetro arbitrário escolhido pelo planejador. Para sistemas de distribuição esse valor varia de 0,15 a 0,30 [83].

É recomendado que o valor seja de 0,15 para aplicação em projeto de eficiência energética do PEE [26]. Na falta do fator de carga admite-se o valor médio da concessionária nos últimos 12 meses antes do projeto.

Essa metodologia de relacionamento entre os fatores de perda e de carga merece uma análise cuidadosa, visto que para sistemas de distribuição, devido à ramificação das redes primárias, as tradicionais relações não são sempre verdadeiras [84]. Isso se deve ao fato do fator de carga de uma rede primária ser avaliado por medição na subestação e de que as perdas em

cada trecho dependem da distribuição de carga ao longo das redes primárias e da configuração do mesmo, sendo possível que o fator de carga da subestação de distribuição não seja igual ao fator de carga das redes secundárias ou de todos os pontos da rede primária de distribuição.

A Tabela 2 mostra os valores de LP , LE_1 , LE_2 , LE_3 e LE_4 , para cada fator de carga e $k=0,15$, como recomendado por [26].

Tabela 2 – Constantes de perdas para $k = 0,15$

F_c	LP	LE_1	LE_2	LE_3	LE_4
0.30	0.250	0.273	0.191	0.351	0.248
0.35	0.280	0.284	0.199	0.520	0.367
0.40	0.313	0.297	0.208	0.710	0.501
0.45	0.348	0.310	0.217	0.921	0.650
0.50	0.384	0.323	0.226	1.153	0.814
0.55	0.422	0.337	0.236	1.407	0.993
0.60	0.462	0.351	0.246	1.682	1.188
0.65	0.504	0.369	0.258	1.976	1.395
0.70	0.547	0.385	0.269	2.293	1.619

Fonte: Procedimentos do Programa de Eficiência Energética, 2013

A concessionária pode apresentar um fator de carga médio anual diferente da série recomendada. Caso isso aconteça deve ser justificado à ANEEL para avaliação e liberação para adoção.

Para projetos de baixa tensão de sistemas aéreos, o valor do custo unitário de demanda evitada deve ser calculado no subgrupo de tarifação A4 e multiplicado por 1,2.

O custo unitário de energia evitada também deve levar em consideração os valores do subgrupo de tarifação A4 e ser multiplicado pelo fator $(1+I_{eBT})$, sendo I_{eBT} o índice de perdas de energia no segmento de baixa tensão, sendo o valor de referência 0,08.

3.3.3 Projeto plurianuais

É muito comum que os projetos de eficiência energética do PEE tenham mais de um ano de execução. Esses projetos são chamados de plurianuais. É necessário prever uma correção de capital para os investimentos realizados em anos diferentes, de acordo com as recomendações de autores de análise de investimentos, sendo as despesas de cada ano trazidas ao valor presente pela mesma taxa de desconto utilizada no RCB.

O Custo Total (CT) de projetos plurianuais deve ser calculado de acordo com as correções monetárias necessárias recomendadas nas bibliografias de análise de viabilidade e investimento. Sendo assim, os custos devem ser corrigidos de acordo com uma taxa de desconto que, nos casos de projetos do setor de energia, são valores recomendados pelo Plano Nacional

de Energia (PNE) vigente na data de submissão do projeto e de acordo com os anos de duração do projeto, considerando o ano 1 (um) como o de início de projeto [26].

O cálculo do CT para projetos plurianuais deve ser realizado de acordo com (22).

$$CT = \sum_j \frac{C_j}{(1+i)^{j-1}} \quad (22)$$

Sendo os termos de (22):

- C_j é o custo do projeto em cada ano de execução
 j é o número de anos do projeto

Na análise de investimentos é comum que os custos ou receitas ocorridos durante o ano sejam consideradas como acontecidos no final do mesmo, quando se sabe que estas são relativamente uniformes durante todo ano [85].

O benefício deve ser de um ano típico de funcionamento, ou seja, após todo o projeto ser implantado e antes que algum equipamento ultrapasse a vida útil prevista [27].

3.4 METODOLOGIAS DE OTIMIZAÇÃO

3.4.1 Algoritmo ACO aplicado

O algoritmo bioinspirado de colônia de formigas foi adaptado com o objetivo de minimizar a relação custo benefício de projetos de eficiência energética do tipo baixa renda. Essa redução se dará pela obtenção de maiores benefícios através da substituição do maior número possível de equipamentos ineficientes associado ao mesmo custo de projeto.

O processo de otimização da relação custo benefício de projetos de eficiência energética pela aplicação do algoritmo ACO pode ser descrito em doze etapas [20].

A etapa inicial do processo de otimização é a entrada de dados. Nesta etapa são definidos os parâmetros de entrada necessários para a execução do algoritmo. Os parâmetros definidos para execução são:

- O número de indivíduos da colônia;
- A taxa de evaporação;
- Número máximo de iterações;
- Número máximo de equipamentos que podem ser instalados no projeto;
- Eficiência dos equipamentos;
- Vida útil dos equipamentos;

- Tempo de utilização dos equipamentos;
- Taxa de desconto dos projetos;
- Custo anual do projeto;
- Perfil de carga;
- Custos unitários de energia nos postos de ponta e fora de ponta;
- Constantes de perdas de energia nos postos de ponta e fora de ponta.

Na etapa 2, a etapa de inicialização da colônia, é iniciado o processo de busca, de acordo com o algoritmo padrão, com uma população de formigas artificiais aleatórias, que representam a primeira amostra de soluções do problema proposto.

Esse conjunto de formigas, que representa um conjunto de soluções, é denominado de colônia [5]. Cada solução será representada por uma matriz onde as colunas representam o número de equipamentos eficientes, previamente definidos no projeto, que devem substituir os equipamentos já existentes, e as linhas representam o tipo de equipamento.

O processo de busca tem início de forma completamente aleatória, sendo as soluções iniciais escolhidas de forma que o custo total referente a inserção dos equipamentos eficientes seja menor do que o custo anual do projeto.

A terceira etapa corresponde à etapa de obtenção dos valores da função objetivo. De posse das soluções iniciais geradas e número de equipamentos eficientes que devem substituir os equipamentos já existentes, é possível calcular o valor da Relação Custo Benefício (RCB). Esses valores necessários são os obtidos a partir da etapa inicial.

A quarta etapa do processo corresponde a obtenção da matriz de feromônio inicial [20]. A matriz de feromônio inicial apresenta a mesma estrutura utilizada na representação do indivíduo [5].

Na matriz de feromônio são armazenados os depósitos de feromônio de cada indivíduo. Este depósito é proporcional à qualidade da solução, no que tange a minimização da relação custo benefício.

O feromônio depositado por uma formiga m , aleatória, é dado por (23) [48]:

$$\Delta MF(m) = \frac{1}{RCB(m)} \quad (23)$$

Sendo os termos de (23):

$\Delta MF(m)$ é a quantidade de feromônio depositado pela formiga m

$RCB(m)$ é o valor da função objetivo (RCB) obtido pela formiga m

Desta forma, a quantidade total de feromônio depositado na MF é dada por (24) [5].

$$MF = \sum_{m=1}^{NF} \Delta MF(m) \quad (24)$$

Sendo os termos de (24) definidos por:

MF é a matriz de feromônio

NF é o número de formigas da colônia

A etapa cinco é caracterizada pela formação da nova colônia. A nova colônia, pelo algoritmo proposto, é composta basicamente por dois tipos de formigas:

- Soldados: São formigas que percorrem a região de solução de forma completamente aleatória e correspondem a 20% da composição da colônia no algoritmo proposto. Estes indivíduos têm papel importante na diversificação do processo de busca pela solução ótima e são responsáveis por encontrar novos ótimos locais e globais, a fim de diversificar a busca de soluções no espaço de interesse.

- Operárias: São formigas que percorrem a região de solução com base nas informações da matriz de feromônio e representam 80% dos indivíduos da colônia. Essas formigas são responsáveis por intensificar e aumentar a credibilidade da solução encontrada no processo meta-heurístico, de acordo com a tendência probabilística de solução.

As novas soluções geradas pelas formigas operárias são obtidas por meio de uma regra de decisão, a qual fornece a probabilidade de cada formiga escolher a solução m . Essa regra de decisão é dada, matematicamente, por (25) [5].

$$P(m) = \frac{MF(m)}{\sum MF} \quad (25)$$

Sendo os termos de (25):

$P(m)$ é a probabilidade da formiga seguir o resultado ótimo

Na sexta etapa do processo de otimização, de posse das novas soluções, é possível calcular os novos valores da relação custo benefício (RCB) para cada solução. Tem início as etapas de iterações do processo de busca de soluções e a obtenção de novos valores para a função objetivo.

A etapa sete consiste na atualização da matriz de feromônio. O depósito na Matriz de Feromônio (MF) tem a mesma estrutura de (24). Estes depósitos têm como objetivo registrar as informações das soluções encontradas por todas as formigas da colônia.

Vale destacar que esses depósitos são acumulativos e, por esse motivo, são onde ficam representados a ideia de inteligência coletiva. A quantidade de feromônio vai sendo acentuada nas melhores soluções encontradas pela colônia, que irá influenciar o comportamento das formigas operárias, que representam 80% da colônia, através da matriz de probabilidade.

Ainda na etapa sete, a matriz de feromônio é influenciada pelo coeficiente de evaporação, que atua reduzindo o acúmulo de feromônio de modo uniforme e aumenta as semelhanças entre a natureza e o algoritmo artificial.

O fenômeno da evaporação de feromônio é representado pelo coeficiente de evaporação ρ , que pode variar entre zero e o valor unitário. Este fenômeno é representado, matematicamente, em (26), onde t é referente ao número de iterações do processo de busca [5].

$$MF^{t+1} = (1 - \rho).MF^t + \sum_{m=1}^{NF} \Delta MF^{t+1}(m) \quad (26)$$

Sendo os termos de (26):

ρ é o fator de evaporação

A matriz de feromônio é atualizada de forma sequencial, ou seja, somente após todas as formigas construírem uma determinada solução [5]. O processo se repete de modo iterativo com constantes atualizações da matriz de feromônio.

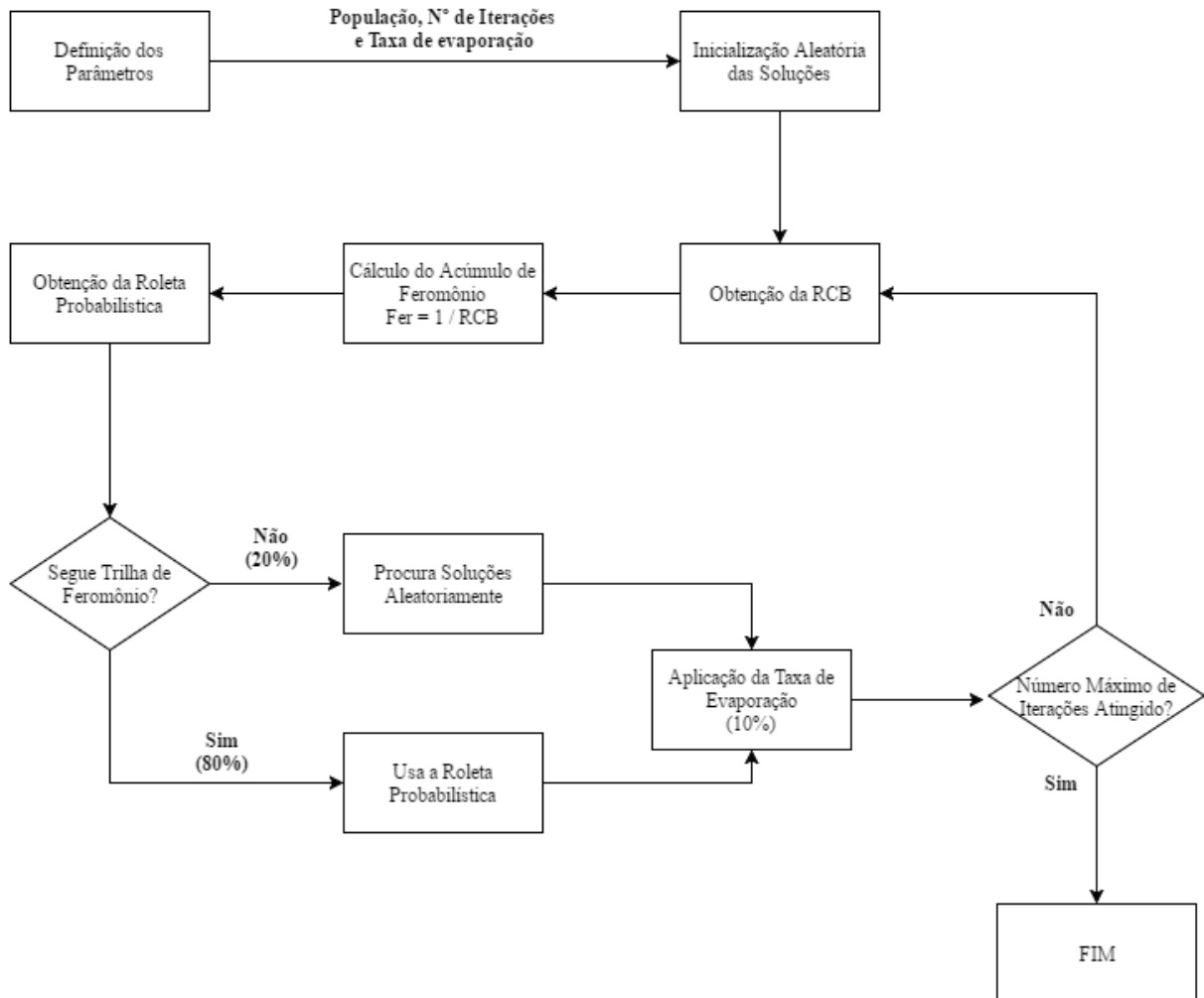
A próxima etapa é o critério de parada. Enquanto a convergência não é obtida, o processo iterativo retorna à etapa 5.

No presente estudo o único critério de parada adotado foi o número de iterações. O processo iterativo é finalizado quando o número máximo de iterações, previamente determinado pelo usuário, é atingido.

A última etapa do processo do algoritmo é a obtenção da solução final, após a convergência do processo de busca. Esta solução é a que apresenta o menor RCB através da inserção do número ótimo de equipamentos eficientes.

A Figura 5 mostra um fluxograma resumido do algoritmo ACO aplicado à otimização da relação custo benefício de projetos de tipologia baixa renda.

Figura 10 - Fluxograma básico do algoritmo ACO aplicado



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

3.4.2 Algoritmo PSO aplicado

O algoritmo bioinspirado de enxame de partículas foi adaptado com o objetivo de minimizar a relação custo benefício de projetos de eficiência energética do tipo baixa renda. Essa redução se dará pela obtenção de maiores benefícios através da substituição do maior número possível de equipamentos ineficientes, associado ao mesmo custo de projeto.

Cada indivíduo no algoritmo representa uma solução possível para o problema de otimização, sendo chamada de partícula [2]. Cada partícula é representada pela posição e pela velocidade, de acordo com o histórico do comportamento coletivo. A posição representa uma possível solução e a velocidade representa uma direção e sentido de mudança em relação a este ponto, a fim de percorrer o espaço de busca de melhores soluções para o problema. Cada partícula armazena a própria melhor posição até o momento, chamada *Personal Best* (P_{best}).

O algoritmo também armazena o melhor resultado encontrado por toda a população, que é chamado de *Global Best* (G_{best}). Esse caracteriza a inteligência coletiva do algoritmo PSO.

A cada iteração, o algoritmo atualiza as posições de cada partícula, de acordo com velocidades próprias anteriores. As posições P_{best} e G_{best} são mostradas em (5).

$$\vec{v}_i(t+1) = \omega \cdot \vec{v}_i(t) + \varphi_1 \cdot r_1 (\vec{P}_{best,i} - \vec{x}_i) + \varphi_2 \cdot r_2 (\vec{G}_{best} - \vec{x}_i) \quad (5)$$

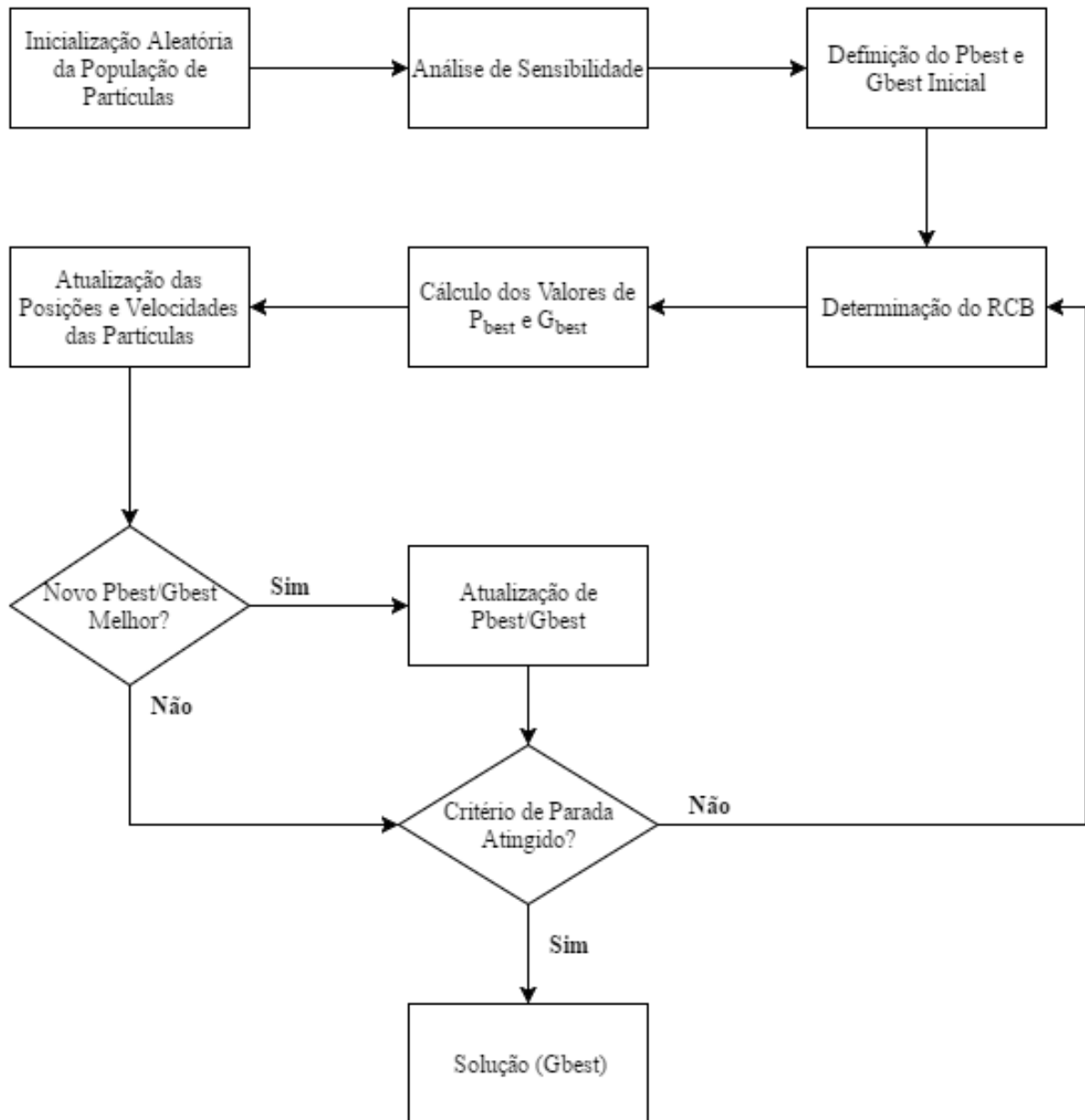
Como visto no capítulo dois, os termos que precedem os valores de posições são termos randômicos e escolhidos de acordo com o projetista ou o interesse de estudo.

Baseado nas novas velocidades, cada partícula atualiza sua própria posição de acordo com (6).

$$\vec{x}_i(t+1) = \vec{x}_i(t) + \vec{v}_i(t+1) \quad (6)$$

O fluxograma básico do algoritmo PSO aplicado é representado pela Figura 6 [2].

Figura 11 - Fluxograma básico do algoritmo PSO aplicado



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Definem-se seis passos para aplicação do algoritmo de enxame de partículas aplicado ao problema de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda [2].

O primeiro passo do algoritmo PSO é a inicialização da população de partículas. De forma aleatória se escolhem os valores das partículas, de acordo com velocidades e posições randômicas e que atendam os critérios de solução do problema.

O passo dois é uma análise de sensibilidade baseado em derivadas, a fim de dar a melhor alocação de posições para as partículas do enxame.

O terceiro passo do algoritmo é o cálculo do RCB do projeto, que é a função objetivo. O RCB é calculado de acordo com as características das partículas definidas, considerando a minimização da variável.

O quarto passo do algoritmo é o armazenamento das melhores posições de cada partícula (P_{best}) e da melhor solução do enxame (G_{best}). Essa etapa é realizada através de comparação direta dos valores de cada partícula.

A partir da segunda iteração, os valores são comparados entre as posições da própria partícula e, se encontrado um valor de função objetivo menor que os anteriores, é armazenado como P_{best} . O mínimo P_{best} entre toda a população é armazenado como G_{best} .

O penúltimo passo é a atualização dos valores de velocidade e de posição de cada partícula, de acordo com (5) e (6). Nesse momento tem início o processo iterativo do algoritmo.

Por fim, repetem-se os passos 3 a 5 do algoritmo até que seja finalizado, quando se atinge o critério de parada pré-determinado pelo usuário, de acordo com seu interesse.

O critério de parada mais comum e que foi aplicado nesse trabalho é o número de iterações.

4 ESTUDO DE CASO

4.1 INTRODUÇÃO

O objetivo desse capítulo é de mostrar a efetividade das metodologias propostas para a otimização de projetos de eficiência energética do PEE da ANEEL de tipologia baixa renda. Para tal, será utilizado um caso real de um projeto cooperado desenvolvido por concessionárias nacionais, em dois estados distintos.

Os resultados obtidos com os algoritmos bioinspirados serão comparados com os resultados reais do projeto, que foi planejado de modo empírico pelas concessionárias.

4.2 ESTUDO DE CASO

4.2.1 Dimensionamento do Projeto Real

O estudo de caso trata de um projeto de tipologia baixa renda, realizado no biênio 2013 – 2014 por uma concessionária nacional, dentro dos padrões exigidos pela ANEEL.

O projeto consistiu na troca de equipamentos na área de concessão da empresa, de acordo com as regras do PEE, e ações complementares de marketing, descarte dos equipamentos substituídos, divulgação de informação sobre conservação de energia e medição e verificação dos resultados.

A tabela 3 mostra os equipamentos que foram substituídos no projeto e os equipamentos eficientes que foram oferecidos, juntamente com o Custo Por Equipamento (CPE), os Custos Relacionados Por Equipamento (CRPE), os Custos Unitários totais (CU) e a Quantidade de equipamentos novos (Qtd), de cada modelo que foram empregados no projeto.

Tabela 3 – Dados de quantitativos do projeto estudado

n	Equip. Antigo	Equip. Novo	CPE (R\$)	CRPE (R\$)	CU (R\$)	Qtd. (Unid)
1	Lâmpada Incand. 60W	Lâmpada FLC 15W	4,57	82,42	86,99	3.300
2	Lâmpada Incand. 100W	Lâmpada FLC 20W	4,85	86,49	91,34	16.500

3	Refrigerador Comum	Refrigerador Eficiente	641,58	1803,05	2444,63	360
4	TV Tubolar	TV LED	1112,36	1696,59	2808,95	90

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Os valores aplicados no cálculo do RCB, que serão aplicados nos algoritmos de estudo, são cedidos pela concessionária e são regulados pelas resoluções homologatórias da ANEEL, de acordo com cada empresa. No projeto em questão foram utilizados dados de acordo com [86] e [87], que são as tarifas e valores aplicáveis aos consumidores na época de concepção do projeto.

Os dados aplicados estão demonstrados na Tabela 4.

Tabela 4 – Dados regulatórios considerados para o projeto

Constantes de Perda		Custos Unitários (R\$/kW.mês)	
$k=0,15$ e $F_c = 0,60$		C_1	24,41
LP	0,4624	C_2	29,56
LE_1	0,35199	C_3	204,64
LE_2	0,24639	C_4	204,64
LE_3	1,68249	C_5	129,73
LE_4	1,18808	C_6	129,73

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Com os dados apresentados na Tabela 4, podemos aplicar (14) e (15) para calcular os valores do custo unitário de energia e do custo unitário da demanda evitada.

Os valores calculados para CEE e CED foram, respectivamente, 142,6517 R\$/MWh e 456,9425 R\$/kW.ano.

Os custos administrativos do projeto, incluindo todas as necessidades operacionais e gerenciais do planejamento até a finalização do projeto, foram de R\$2.478.746,80. O custo final do projeto, incluindo os materiais, foram de R\$2.927.049,30.

O projeto teve duração total de dois anos, sendo estimado que sua execução seria uniforme durante todo o período, ou seja, 50% da execução e dos investimentos financeiros necessários seriam consumidos em cada ano de execução.

A taxa de desconto prevista pelo Plano Nacional da Energia foi de 8% no ano do projeto, que foi o valor aplicado para a execução dos cálculos. Os valores de Vida Útil dos equipamentos (VU) foram levantados de acordo com as recomendações técnicas dos fabricantes e os Tempos Médios de Utilização (TU), assim como a Eficiência Por Equipamento (EPE), foram consideradas de acordo com [20].

Todos os valores necessários para os cálculos relativos aos equipamentos considerados estão apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Dados dos equipamentos eficientes

Equipamentos Eficientes	VU (anos)	EPE (Watts)	TU (h/ano)
Lâmpada Fluo.15 W	4,38	45	1460
Lâmpada Fluo.20W	4,38	80	1460
Refrigerador Eficiente	10	26	8760
Televisor LED	20	30	1825

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Para todos os equipamentos foi considerado unitário o fator de coincidência na ponta, visto que se tratam de equipamentos que são normalmente usados no horário de ponta do sistema elétrico da concessionária.

Com os dados da concessionária e os dados dos equipamentos a serem substituídos, foram calculados os valores de custos anuais do projeto, de acordo com (9), (10) e (11). Também foram calculados os valores do fator de recuperação de capital, por equipamento, de acordo com (12).

Os valores são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Custos anuais do projeto

Índice	Valor
CE_1	R\$143.533,50
CE_2	R\$753.555,00
CE_3	R\$440.033,40
CE_4	R\$126.402,75
CE_t	R\$1.463.524,65
$FRC_{lâmpadas}$	0,2796/ano
$FRC_{refrigeradores}$	0,1490/ano
FRC_{tv}	0,1019/ano
CA_1	R\$40.131,96
CA_2	R\$210.693,98
CA_3	R\$65.564,98
CA_4	R\$12.880,44
CA_t	R\$329.271,36
CEE	142,6519 R\$/MWh
CED	456,9425 R\$/kW.ano
EE	2.230,93 MWh/ano
RDP	1.480,56 kW.ano

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Por se tratar de um projeto bianual, faz-se necessário aplicar a correção monetária do investimento realizado no segundo ano, trazendo para o valor presente líquido [78]. Os

valores do custo total do projeto devem ser corrigidos monetariamente, de acordo com a taxa de desconto definida de 8%, para aplicação no cálculo da relação custo benefício.

Dessa forma, os valores corrigidos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Valores do projeto corrigidos

Índice	Valor (R\$)
CA_{tano1}	329.271,37
CA_{tano2}	304.880,90
CA_{tfinal}	634.152,27
BA_t	994.781,47

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Dessa forma, todos os dados ficam disponíveis para aplicação de (8) e o cálculo do relação custo benefício global do projeto real, que é mostrado em (27).

$$RCB = \frac{CA_t}{BA_t} = \frac{634.152,27}{994.781,47} = 0,637 \quad (27)$$

Todos os cálculos do estudo de caso são detalhados, passo a passo, no Apêndice B.

4.2.2 Condições para Aplicação dos Métodos Bioinspirados

A fim de demonstrar a ineficiência do método empírico e mostrar o potencial da aplicação de uma metodologia matemática computacional para o dimensionamento, o projeto em 4.2.1 será submetido aos algoritmos ACO e PSO, sendo comparados os resultados obtidos através das metodologias com o resultado real.

Para os dois métodos bioinspirados serão realizadas cinco simulações, com variação do número da população e do número de iterações como critério de parada.

As cinco simulações propostas são mostradas na Tabela 8, com a variação da população e do critério de parada, cujos resultados são mostrados mais adiante.

Tabela 8 – Variações das simulações aplicadas para as metodologias bioinspiradas

Simulação	Tamanho da População	Número máximo Iterações
1	10	10
2	50	50
3	100	100
4	250	250
5	1000	1000

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

Em ambas as aplicações, para evitar valores absurdos em comparação a um projeto real, os quantitativos de equipamentos foram limitados a um valor máximo nos algoritmos. Esses quantitativos estão demonstrados na Tabela 9.

Tabela 9 – Número máximo de equipamentos

Equipamentos Eficientes	QM
Lâmpada Fluo.15 W	50.000
Lâmpada Fluo.20W	50.000
Refrigerador	1.000
Televisor LED	1.000

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

O valor da taxa de evaporação para aplicação do ACO será fixado em 10%.

Para aplicação do método PSO os parâmetros definidos serão de acordo com o mostrado na Tabela 10.

Tabela 10 – Parâmetros aplicados ao PSO

ω_0	ω_f	ϕ_1	ϕ_2
0,9	0,4	2	2

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2014

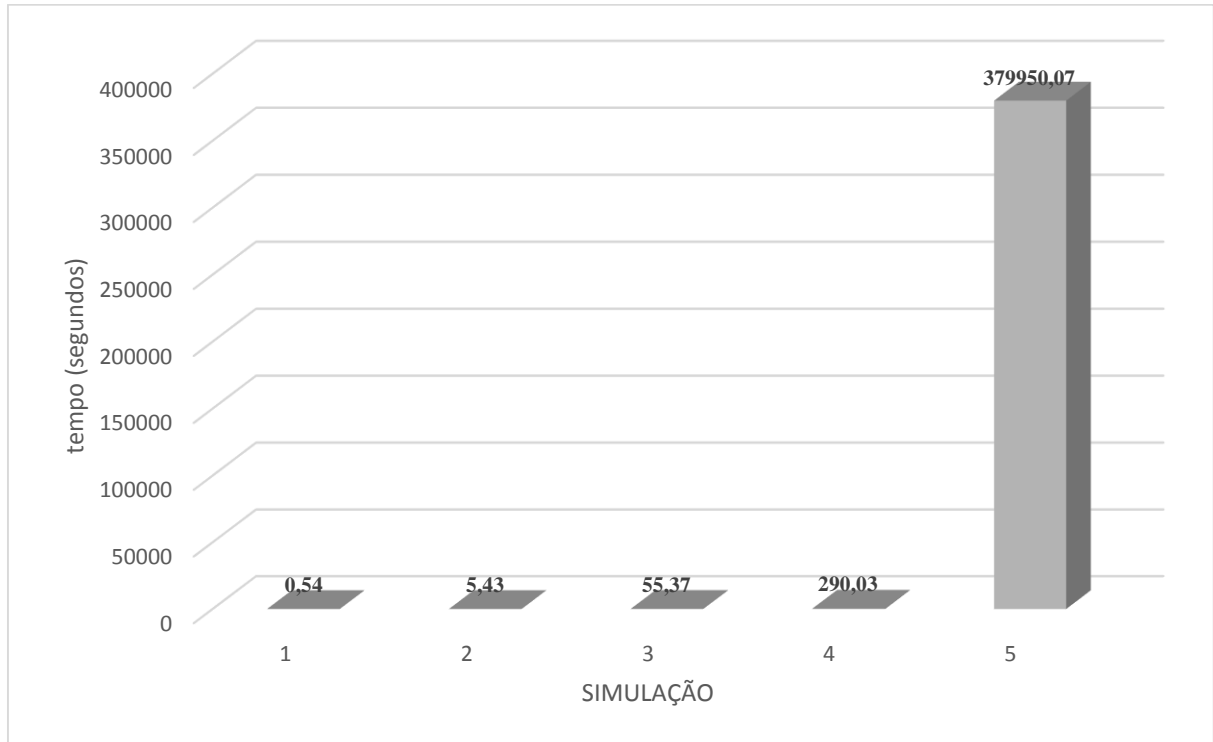
4.2.3 Resultados

De acordo com a Tabela 8 e os parâmetros pré-definidos, o projeto foi simulado nas metodologias bioinspiradas ACO e PSO, a fim de que os resultados sejam comparados com os resultados do projeto real e sejam analisados seus tempos de execução, comparativamente.

Para cada configuração simulada, de acordo com a Tabela 8, os algoritmos foram processados 25 vezes, sendo tomado para análise o valor médio dos resultados obtidos para cada processo iterativo aplicado.

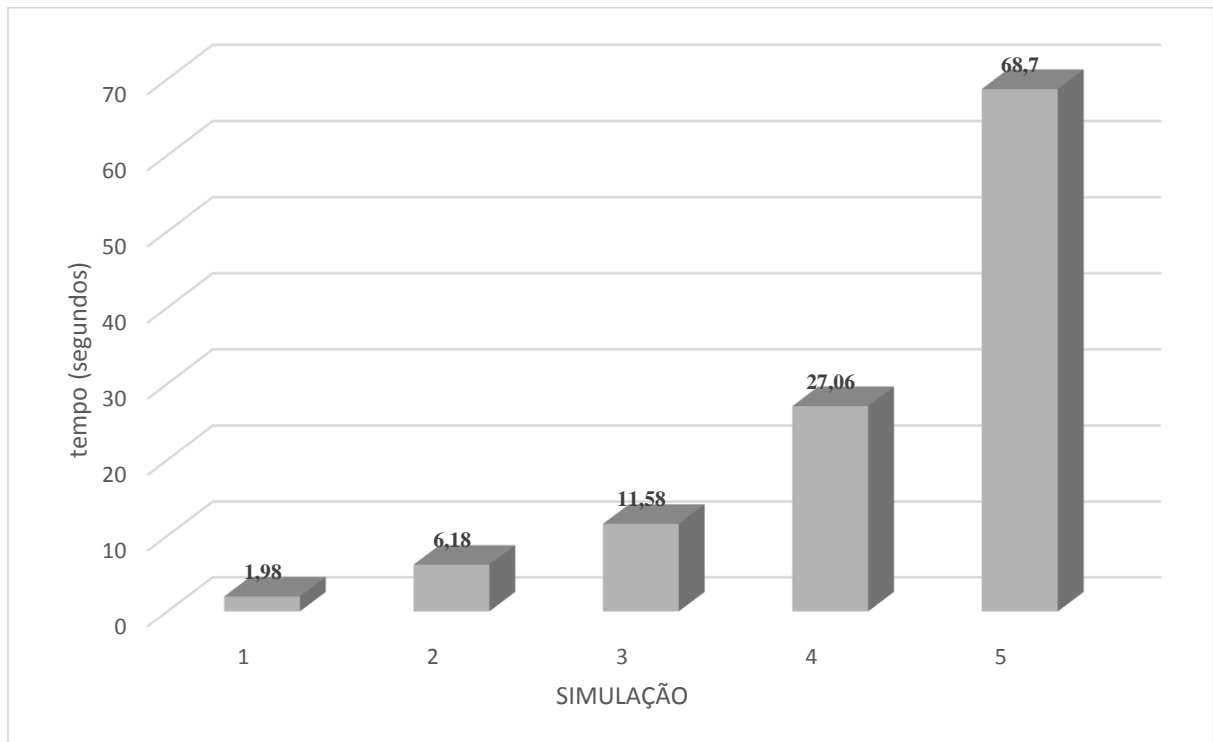
Os Gráficos 4 e 5 mostram os tempos de convergência encontrados para cada simulação, em segundos, respectivamente, no ACO e no PSO.

Figura 12 - Tempos de convergência do ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 13 - Tempos de convergência do PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

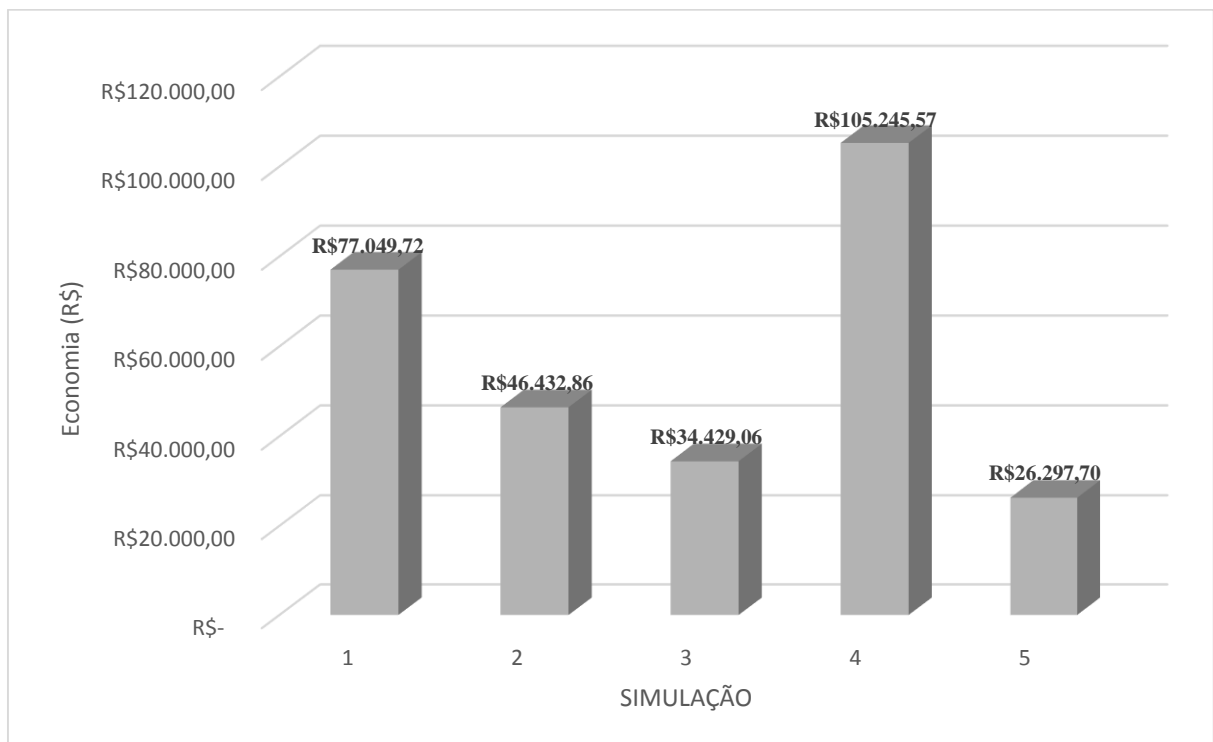
Na análise dos gráficos é possível perceber que até a quarta simulação o PSO consome mais tempo para convergência que o ACO. Na quinta simulação o PSO tem uma convergência mais rápida que o ACO, em torno de 5.500 vezes.

De qualquer forma, seja qual for o algoritmo e a configuração escolhida, os tempos das simulações para ambos são aceitáveis para aplicação em projetos de eficiência energética, visto que no modo empírico pode-se demandar até quarenta e oito horas de trabalho para o dimensionamento de um projeto com RCB dentro do aceitável pela ANEEL.

Os Gráficos 6 e 7 mostram os valores encontrados para os resultados financeiros, em R\$, de acordo com cada simulação, respectivamente, no ACO e no PSO.

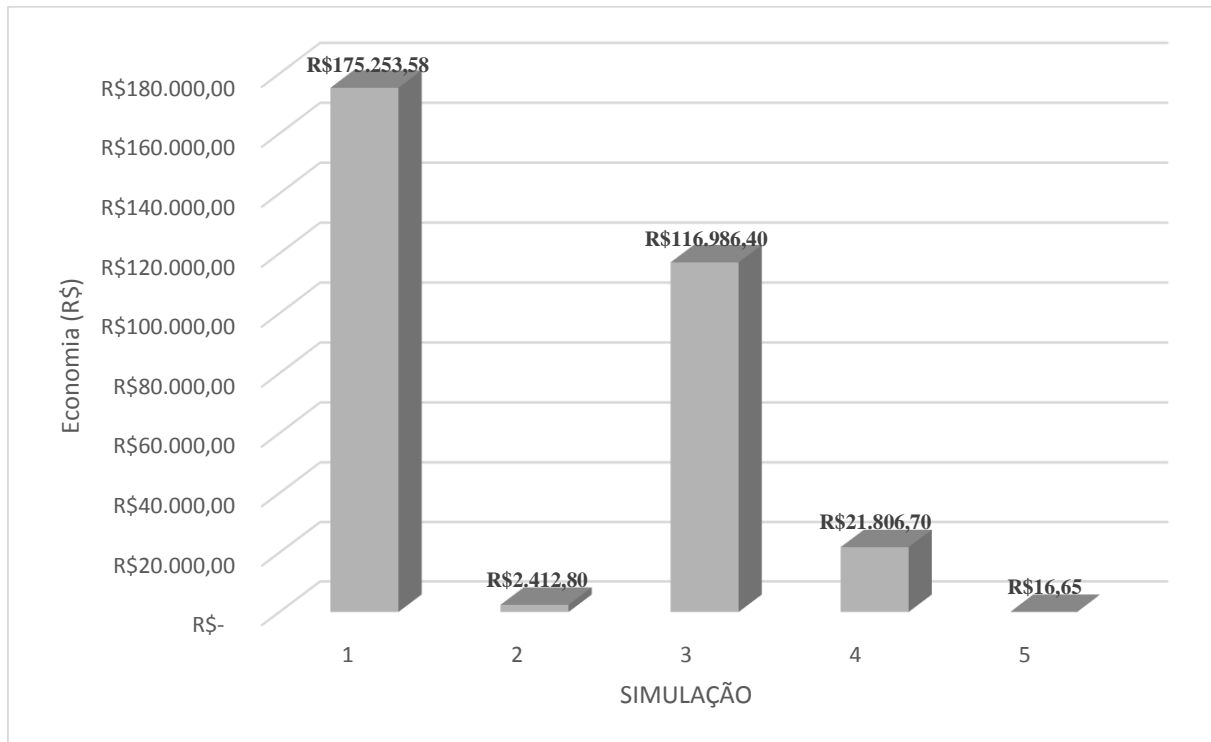
Vale ressaltar aqui que, em se tratando de projetos de eficiência energética, principalmente de projetos regulatórios para concessionárias, existe a obrigatoriedade do consumo de 0,5% da receita operacional líquida anual, sendo os melhores resultados práticos aqueles que consomem o recurso disponível em sua totalidade, a fim de evitar a criação de novos projetos e retrabalhos advindos da necessidade regulatória de consumo da ROL.

Figura 14 – Resultado financeiro no ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 15 – Resultado financeiro no PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

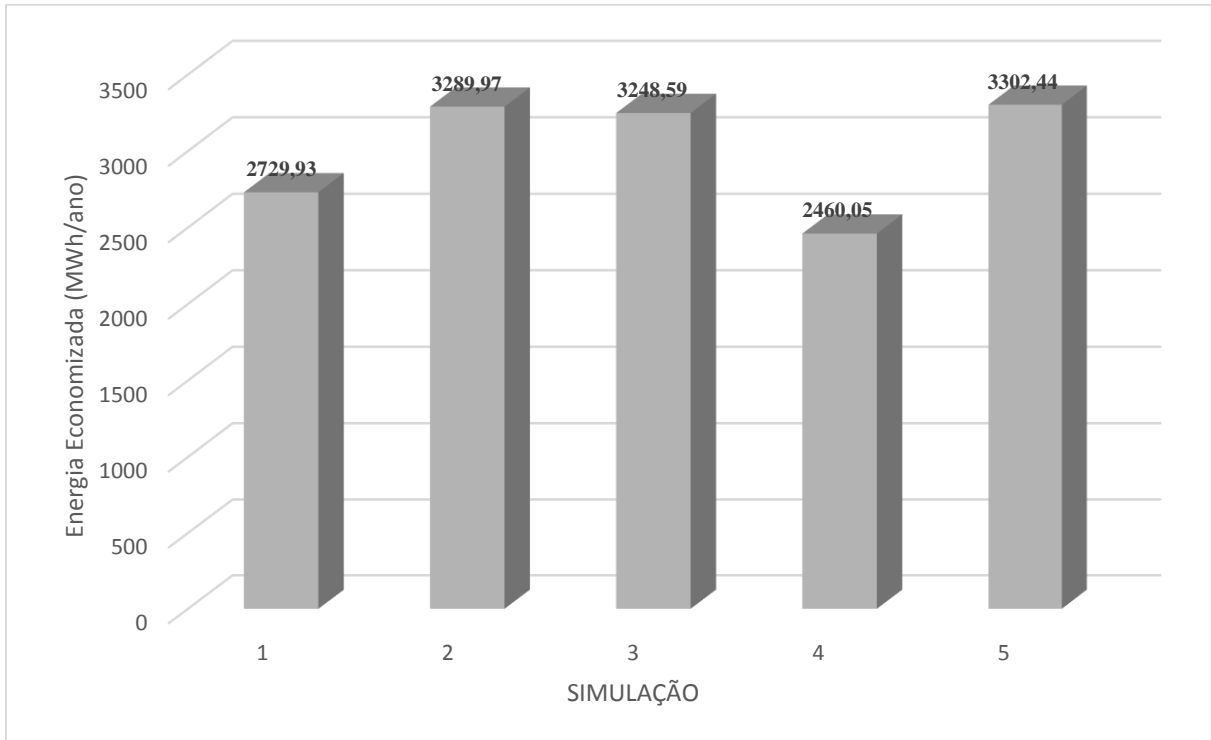
Pode-se perceber que, apesar da aleatoriedade dos resultados para ambos os algoritmos, em todas as cinco simulações há uma economia financeira, seja no PSO ou no ACO. Também vale destacar que em nenhum caso foi ultrapassado o valor máximo disponibilizado.

Dentre as dez simulações executadas, a maior economia financeira seria da primeira simulação do PSO. Porém, o melhor resultado prático obtido dentre as simulações é o quinto do PSO, em que temos o maior consumo financeiro possível, atingindo o requisito regulatório de consumo da ROL da concessionária e aplicando-o quase que na totalidade em eficiência energética, objetivo do programa da ANEEL.

Na quinta simulação do PSO há um consumo ideal do recurso financeiro disponível, evitando retrabalho e a necessidade de novos projetos da mesma tipologia.

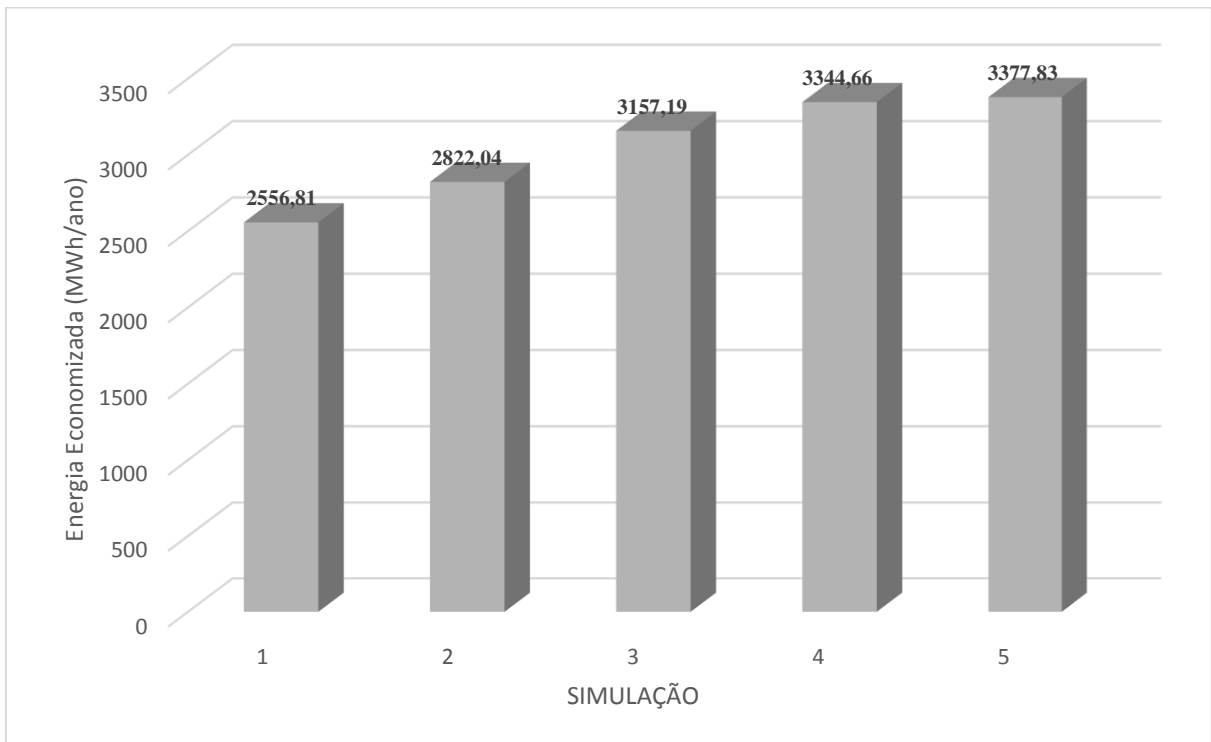
Os Gráficos 8 e 9 mostram os valores encontrados para as energias economizadas, em kWh/ano, de acordo com as configurações sugeridas por cada simulação, respectivamente, no ACO e no PSO.

Figura 16 - Economia de energia no ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 17 - Economia de energia no PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

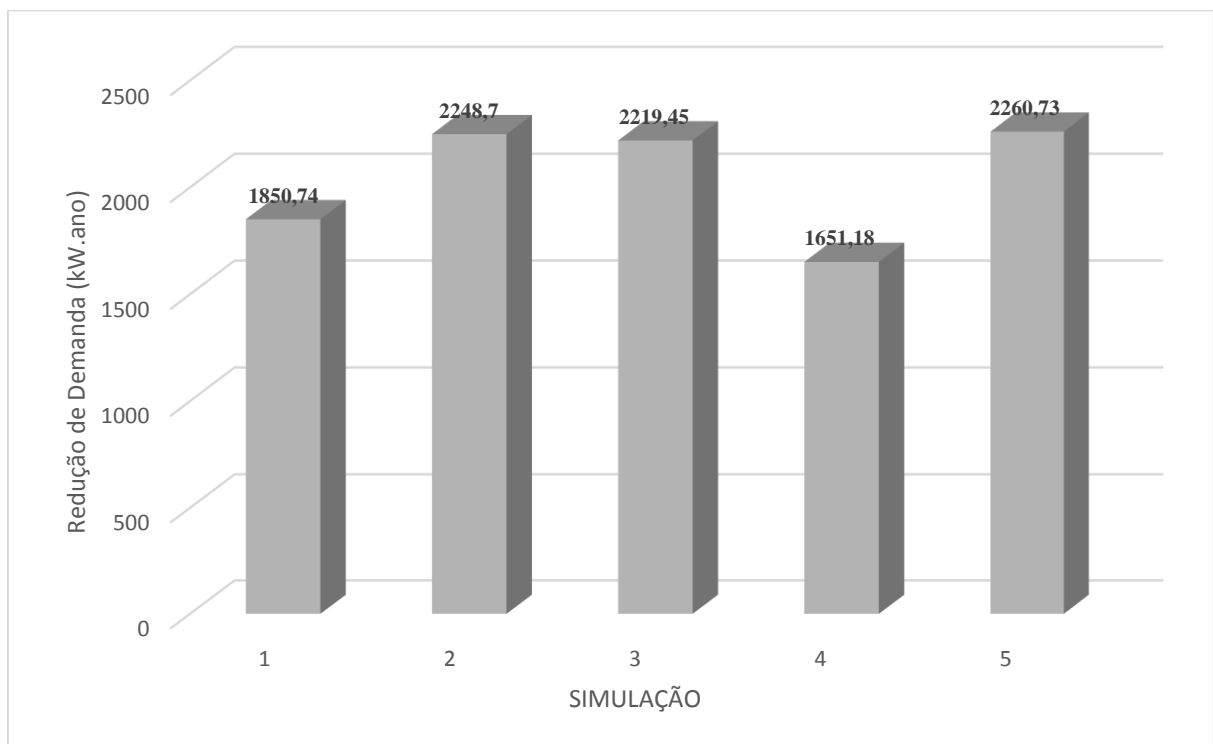
Analisando os resultados obtidos com os algoritmos, podemos notar que em todas as simulações a energia economizada com aplicação da metodologia computacional é maior que no projeto dimensionado pelo método empírico, de 2.231 MWh/ano.

Dessa forma, em se tratando de um projeto de eficiência energética, podemos concluir que os algoritmos bioinspirados conseguem um desempenho técnico melhor que os métodos praticados no mercado atualmente, alcançando uma maior eficiência do ponto de vista da energia economizada anual.

Vale destacar que o desempenho de ambos os algoritmos são similares, obtendo as maiores economias de energia na quinta simulação, com uma maior população e um critério de parada maior.

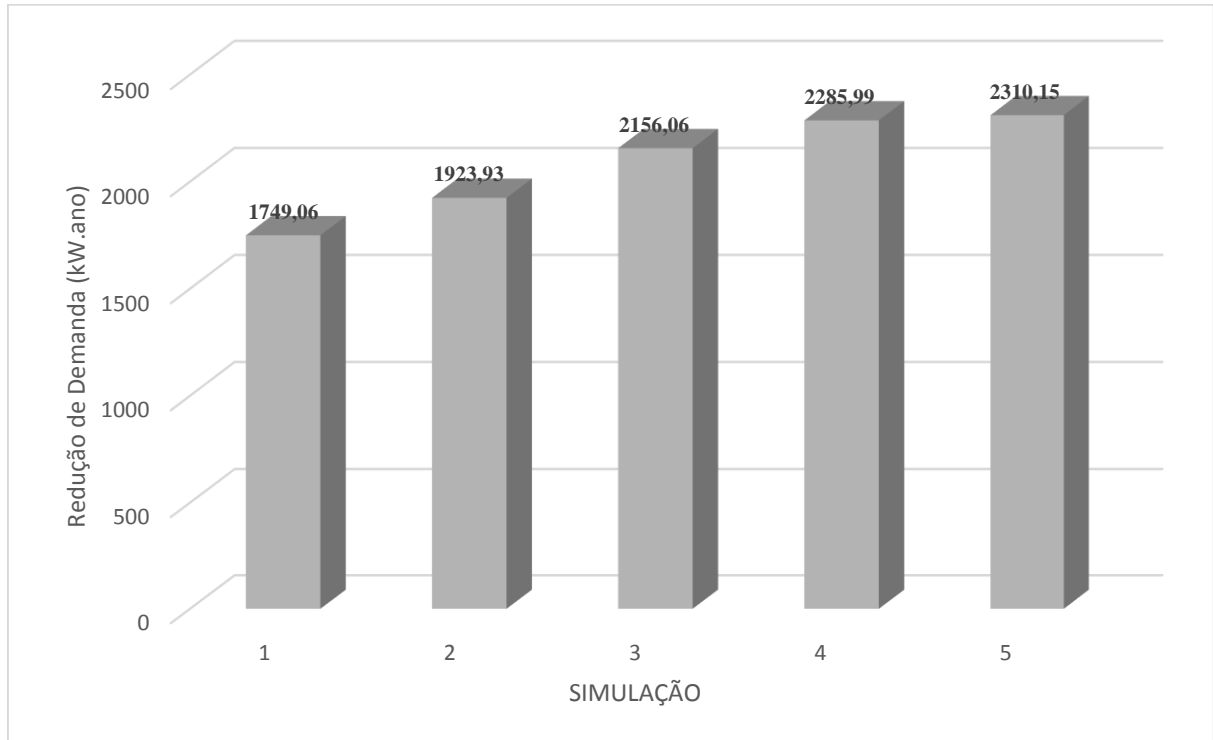
Os Gráficos 10 e 11 mostram os valores encontrados para a redução de demanda na ponta, em kW.ano, de acordo com as configurações sugeridas por cada simulação, respectivamente, no ACO e no PSO.

Figura 18 - Redução de demanda na ponta no ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 19 - Redução de demanda na ponta no PSO



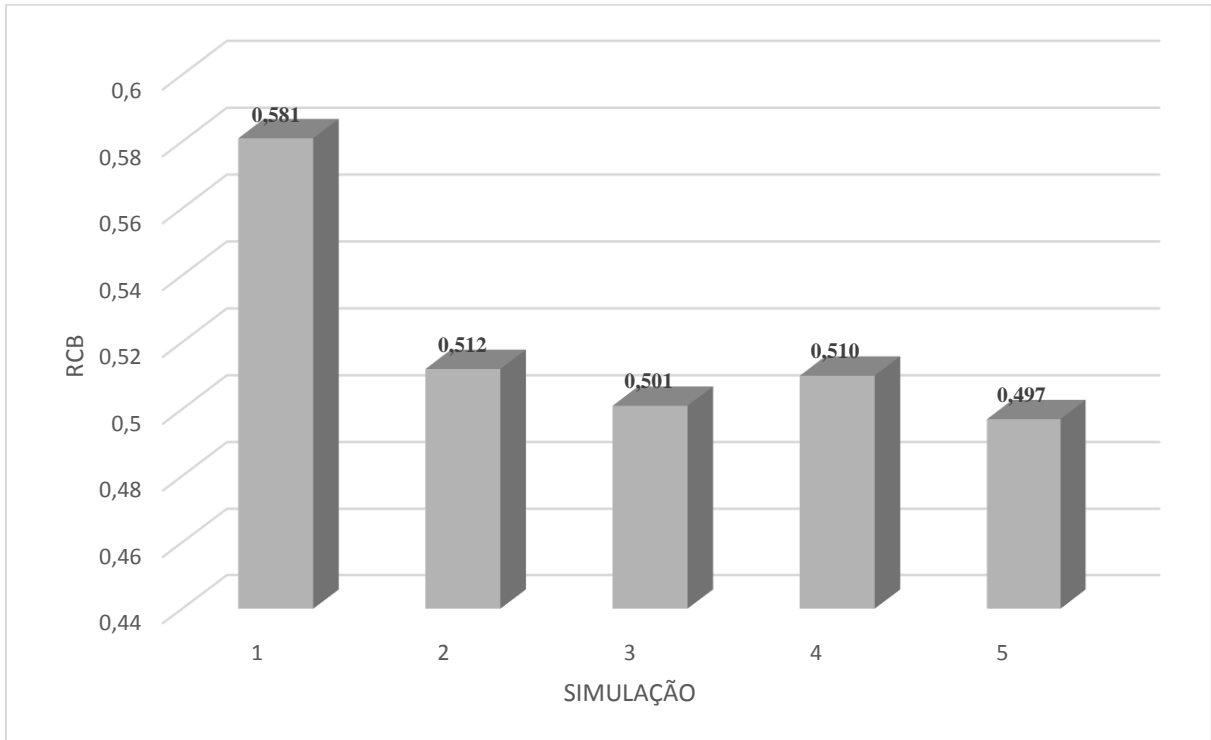
Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Do ponto de vista da redução de demanda na ponta, os algoritmos também se mostraram mais eficientes que o método empírico utilizado para o dimensionamento dos projetos na prática. Em todas as simulações, de ambos os algoritmos, tivemos um resultado melhor que 1.480 kW.ano de redução de demanda na ponta.

Novamente os comportamentos dos algoritmos foram similares e o maior resultado energético foi obtido na quinta simulação, sendo aproximadamente 55% maior que o resultado obtido empiricamente.

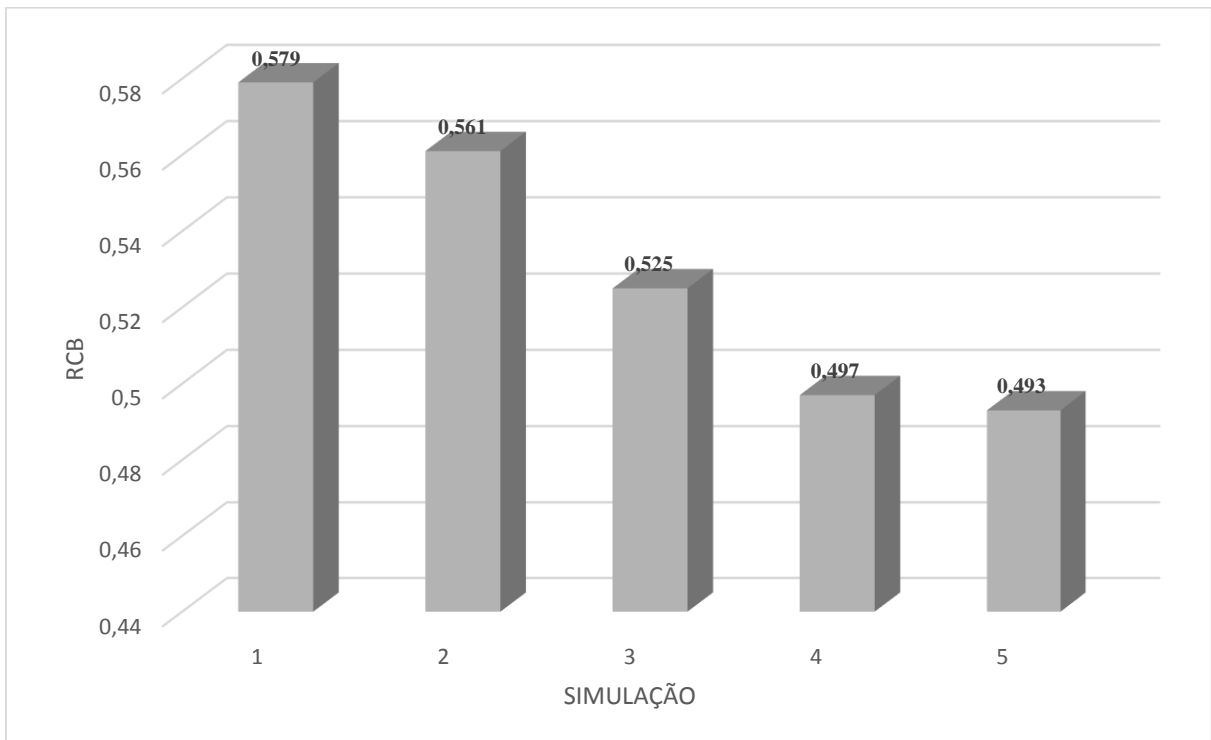
Os Gráficos 12 e 13 mostram os valores encontrados para o RCB, de acordo com as configurações sugeridas por cada simulação, respectivamente, no ACO e no PSO.

Figura 20 - Valor do RCB no ACO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 21 - Valor do RCB no PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Visto que o RCB obtido no estudo de caso real foi de 0,637, os algoritmos bioinspirados aplicados atingiram o objetivo e foi alcançado, em 100% das simulações realizadas, um RCB menor que do caso estudado.

Os algoritmos construídos se mostram, dessa forma, eficazes na minimização do indicador de relação custo benefício de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda.

Os algoritmos alcançaram RCB bem próximos em todas as simulações, atingindo os melhores resultados de minimização na quinta simulação, em ambos os casos. O melhor resultado foi obtido com o PSO, no valor de 0,493.

As Tabelas 11 e 12 mostram os dimensionamentos de equipamentos propostos por cada simulação, respectivamente, pelo algoritmo ACO e PSO.

Tabela 11 – Soluções do projeto pelo ACO

Simulação	Lâmpadas	Lâmpadas	Refrigeradores	TV LED
	FLC 15W	FLC 20W	Eficientes	
1	5.102	20.200	144	47
2	3.480	26.132	35	21
3	847	27.227	39	72
4	2.916	26.324	21	40
5	199	28.105	3	110

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Tabela 12 – Soluções do projeto pelo PSO

Simulação	Lâmpadas	Lâmpadas	Refrigeradores	TV LED
	FLC 15W	FLC 20W	Eficientes	
1	3.705	19.695	4	221
2	8.607	19.452	63	104
3	3.557	24.920	47	39
4	2.566	27.104	35	43
5	2.849	27.250	24	48

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

4.3 CONCLUSÕES

O capítulo mostrou os resultados alcançados por duas meta-heurísticas bioinspiradas na aplicação de um projeto real do programa de eficiência energética da ANEEL.

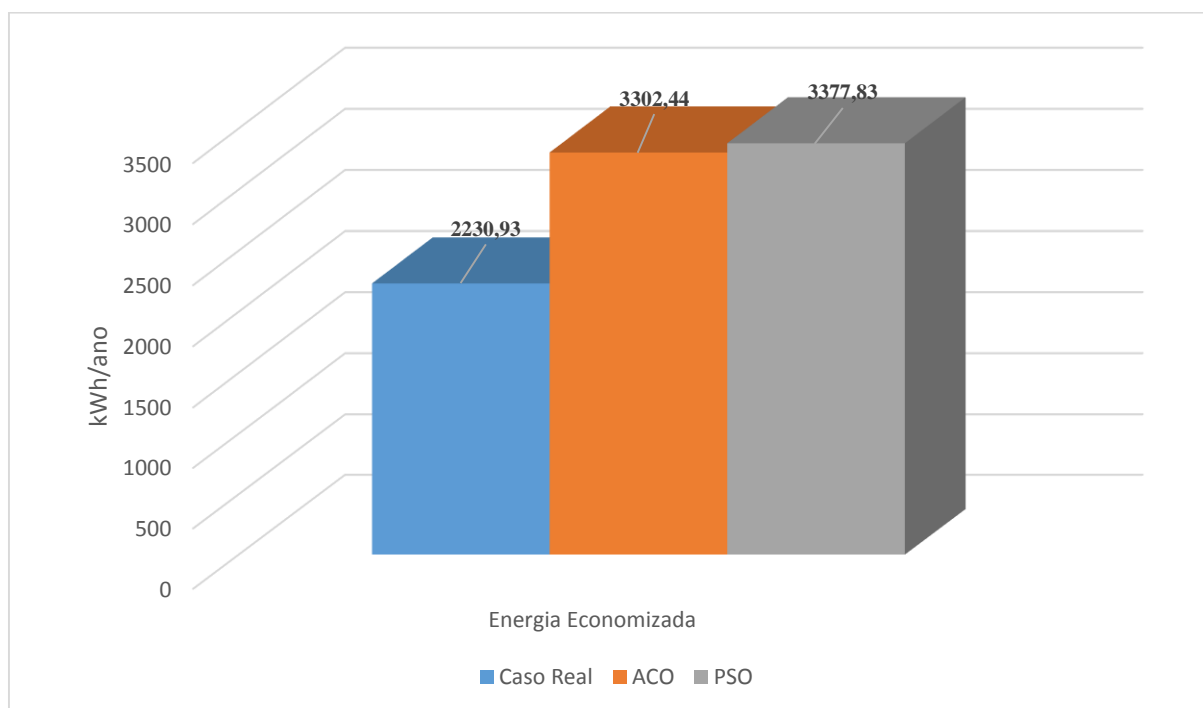
Para ambos os algoritmos foram fixados parâmetros iniciais de acordo com as recomendações das bibliografias consultadas e reconhecidas nessa dissertação.

Em todas as cinco simulações propostas, para cada algoritmo, com variação do critério de parada e do número de matrizes na busca de soluções, os resultados das meta-heurísticas foram melhores sob qualquer ponto de vista de análise:

- Do ponto de vista técnico, os algoritmos apresentaram melhores resultados de energia economizada e redução de demanda na ponta, visto que os valores alcançados foram maiores que os obtidos com o dimensionamento empírico.

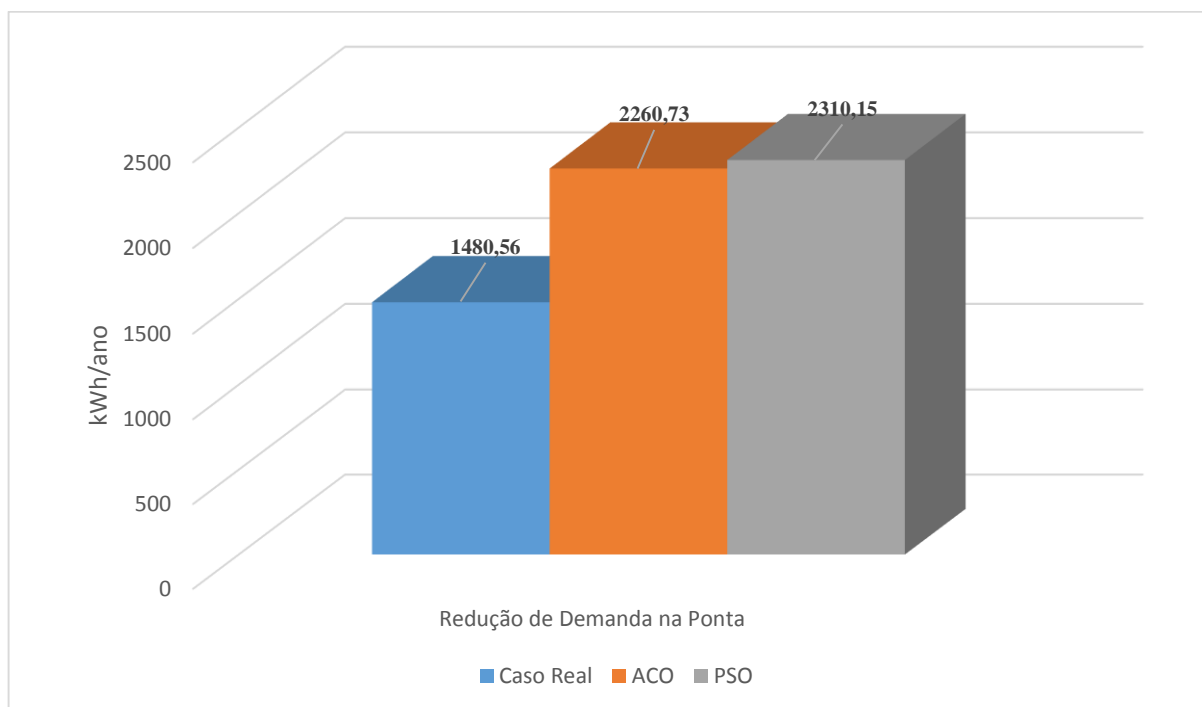
Os Gráficos 14 e 15 mostram, respectivamente, os valores de energia economizada e de redução de demanda na ponta obtidos no dimensionamento empírico e os melhores resultados obtidos com o dimensionamento no ACO e no PSO.

Figura 22 – Comparativo entre energia economizada real, ACO e PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Figura 23 – Comparativo entre redução de demanda na ponta real, ACO e PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

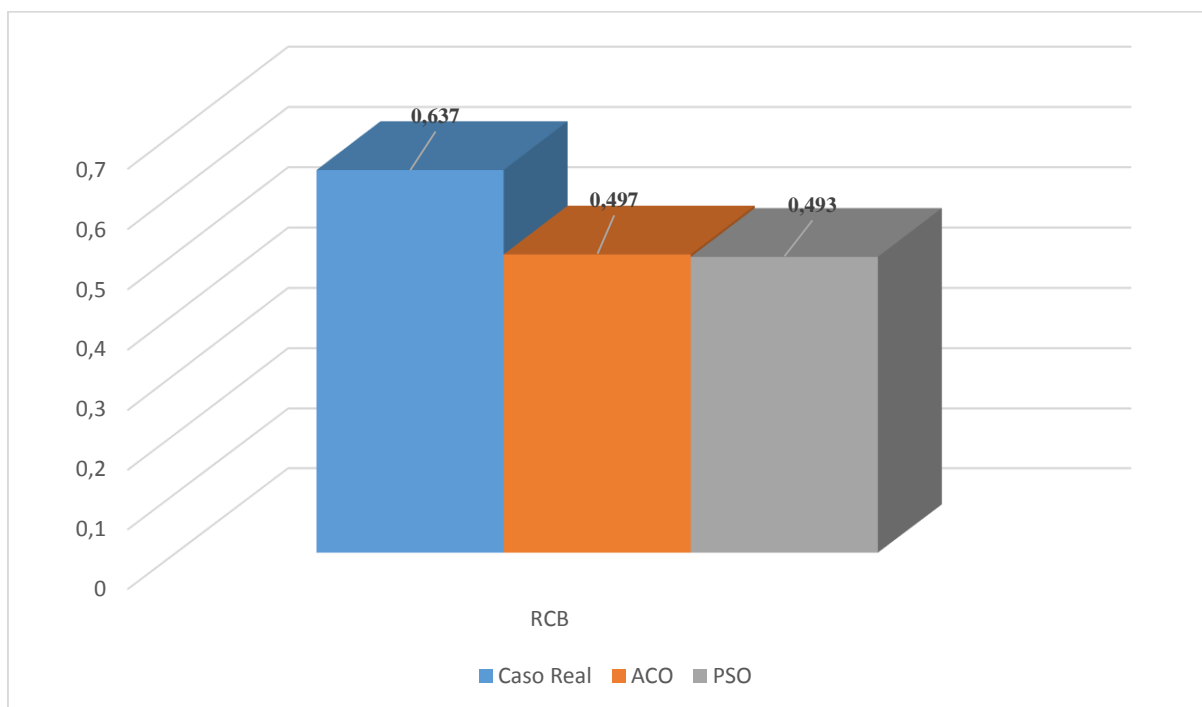
- Do ponto de vista financeiro, os algoritmos apresentaram economia em relação ao projeto dimensionado empiricamente. Visto que existe a necessidade do consumo do recurso financeiro, obrigatoriamente, quanto menor a economia financeira melhor o resultado do ponto de vista da sociedade e da concessionária, desde que se obtenha maiores resultados energéticos.

Os Gráficos 6 e 7 mostraram as economias financeiras em relação ao projeto real, sendo o melhor resultado obtido pela quinta simulação no PSO.

Vale ressaltar que, com a economia financeira, pode-se aplicar os recursos em outros projetos de eficiência energética, o que não se mostra viável na prática devido aos custos de mobilização e planejamento de um novo projeto. Dessa forma, o mais recomendável é que todo o recurso seja consumido em um único projeto com o maior benefício energético.

Por fim, tratando-se de um problema de minimização do RCB, o Gráfico 16 mostra o comparativo entre o resultado obtido pela concessionária e os melhores resultados obtidos com a aplicação dos algoritmos bioinspirados ACO e PSO, ambos na quinta simulação.

Figura 24 – Comparativo entre os RCBs do caso real, do ACO e do PSO



Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

Fica claro que os algoritmos bioinspirados obtiveram o resultado esperado, visto que conseguem dimensionar um projeto baixa renda com menor RCB que o projeto dimensionado pela concessionária de energia na metodologia atual.

Aliado aos resultados obtidos pelos algoritmos, temos o ineditismo de um estudo realizado para sugerir uma metodologia lógica computacional para o dimensionamento de projetos do programa de eficiência energética de tipo baixa renda, que são dimensionados de modo empírico pelas concessionárias e prestadores de serviço.

Diante dos resultados expostos, pode-se concluir que os algoritmos aplicados são promissores e se mostraram satisfatórios para dimensionamento de projetos de tipologia baixa renda.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

5.1 INTRODUÇÃO

Neste trabalho foram utilizados dois algoritmos bioinspirados, *Ant Colony Optimization* e *Particle Swarm Optimization*, para o dimensionamento de projetos de eficiência energética de tipologia baixa renda e para otimização do principal indicador de avaliação da ANEEL para esses projetos, a relação custo benefício.

Ambos os algoritmos se mostraram eficientes para o projeto estudado. Embora isso seja verdade, é possível aperfeiçoar o seu desempenho através de uma expansão de opções de modelos de equipamentos e generalização dos algoritmos propostos.

Em relação ao desempenho dos algoritmos, apesar de não ser a finalidade do estudo, foi analisado qualitativamente na conclusão.

O capítulo tem a finalidade de sintetizar as principais conclusões sobre os resultados obtidos na dissertação, comparar os resultados obtidos de modo conclusivo e sugerir pesquisas e investigações de trabalhos futuros.

5.2 CONCLUSÕES

Projetos de eficiência energética são uma das opções para o atendimento da demanda crescente de energia elétrica em detrimento de investimentos na expansão do sistema elétrico, que além de causar danos ambientais podem resultar em problemas culturais e demandar um grande período de tempo para resposta à necessidade.

Apesar da importância e da necessidade atual dos projetos de eficiência energética, além dos altos investimentos realizados pelas concessionárias devido ao programa de eficiência energética da ANEEL, não foram encontrados estudos voltados à otimização dos indicadores técnicos e econômicos dos projetos baixa renda. A própria natureza de obrigatoriedade regulatória, sem uma cobrança por aumento dos resultados, faz com que as concessionárias não se preocupem em criar políticas que incentivem essa melhoria técnica na aplicação dos recursos.

Ficou evidenciado que a aplicação de uma lógica computacional em detrimento do método empírico para o dimensionamento do projeto, por si só, já traz melhorias nos resultados do processo de dimensionamento dos projetos. Há um direcionamento para a formação do mix de equipamentos a serem aplicados no projeto e a melhoria do indicador técnico de avaliação dos projetos pelo órgão regulador.

Além da melhoria da relação custo benefício dos projetos, há a melhoria dos benefícios energéticos do projeto, objetivo fim de qualquer projeto de eficiência energética. Em todos os casos estudados há uma potencialização da energia economizada e da redução de demanda na ponta, principais requisitos técnicos dos projeto do programa de eficiência energética da ANEEL, de quaisquer tipologias de projetos.

Há ainda o benefício econômico, visto que, seja qual fosse a metodologia aplicada o resultado financeiro do projeto foi sempre melhor. Isso faz com que os recursos economizados possam ser empregados em outros projetos ou na melhoria do projeto em questão, potencializando ainda mais o investimento do programa de eficiência energética.

Dessa forma, sob a ótica principal da ANEEL, que é enxergar os projetos de eficiência energética da ótica da sociedade, podemos concluir que a adoção das metodologias foram satisfatórias de qualquer ponto de vista de análise, seja do ponto de vista técnico, ao produzir projetos com maiores benefícios energéticos, maior energia economizada e maior redução de demanda na ponta, seja do ponto de vista econômico, ao dimensionar projetos com valores menores de investimento sem prejudicar o desempenho técnico.

Do ponto de vista da análise das metodologias bioinspiradas utilizadas, os tempos de execução dos algoritmos e o número de iterações para convergência foram satisfatórios para projetos de eficiência energética. O comportamento dos algoritmos foram similares, minimizando o indicador estudado à medida que se aumenta a população e o número de iterações como critério de parada. Ambos apresentaram comportamento satisfatório para análise do projeto.

Ainda pode-se observar que, para maiores populações, o *Ant Colony Optimization* necessita de um tempo maior para convergência em relação ao *Particle Swarm Optimization*. Para pequenas populações os tempos de execuções são bem semelhantes. O tempo de convergência do ACO fica destacadamente alto na simulação 5 em relação ao PSO, que se apresenta bem mais viável para aplicação.

5.3 DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

Existem alguns pontos de atenção que merecem estudos futuros:

- Generalização dos algoritmos para outras tipologias;
- Maximização dos benefícios;
- Parâmetros adotados no modelo matemático;
- Parâmetros adotados nos algoritmos;

- Aceleração da convergência.

Um tema central para futuras pesquisas é a generalização das metodologias propostas para outros equipamentos a serem empregados na tipologia baixa renda e para expansão de soluções às demais tipologias existentes no programa de eficiência energética.

Fundamentalmente as tipologias que fazem uso de troca de equipamentos, de lâmpadas à motores, não possuem metodologias de otimização de resultados e uma lógica computacional para aplicação. A modelagem de outros equipamentos e a generalização dos algoritmos são fundamentais para aplicação prática em todo o programa de eficiência energética da ANEEL.

Um segundo tipo de avanço nos algoritmos propostos é a aplicação de uma função multiobjetivo para executar a maximização dos benefícios energéticos dos projetos paralelamente a minimização do RCB.

Os parâmetros adotados na proposta de estudo de caso estão de acordo com as sugestões da ANEEL, dentro do padrão de utilização das concessionárias. Cabe uma discussão se os parâmetros sugeridos são os mais eficientes para os projetos de eficiência energética do programa e as justificativas para a adoção de outros parâmetros de fator de carga, fator de perda e as constantes do equacionamento do problema. Há na literatura vários estudos que discutem e propõem novas metodologias para o cálculo de perdas no sistema elétrico, de tal forma que um estudo futuro de novas metodologias, em detrimento do CODI 19-34 ABRADDEE, podem ser desenvolvidas para repensar os valores dos custos unitários de perdas e das constantes de perdas adotadas.

Os parâmetros das meta-heurísticas utilizadas foram fixados de acordo com as recomendações das bibliografias estudadas. Estes são fundamentais para a potencialização dos resultados, em qualquer meta-heurística abordada, devendo-se realizar estudos paramétricos das constantes dos algoritmos aplicados, a fim de potencializar os resultados encontrados. A definição dos valores ideais dos parâmetros dos algoritmos para aplicação aos casos de projetos de eficiência energética torna-se um tema importante para futuras pesquisas.

Paralelo à definição dos melhores parâmetros a serem adotados, um fator importante é a adoção de parâmetros variáveis no decorrer das iterações, de modo que se adaptem de acordo com o comportamento dos algoritmos, potencializando os resultados com as meta-heurísticas.

É possível estudar outras meta-heurísticas para comparação com o ACO e o PSO, além de identificar o comportamento de outros algoritmos para solução de problemas de eficiência energética do programa de eficiência energética da ANEEL.

Em último grau, pretende-se desenvolver um software para aplicação ao programa de eficiência energética da ANEEL no âmbito geral, podendo ser tratado até como um projeto de Pesquisa e Desenvolvimento (P&D) financiado pelas próprias concessionárias através do programa de P&D da ANEEL, visto que um dos fundamentos para financiamento é que os projetos possam ser aplicados ao PEE futuramente.

REFERÊNCIAS

- [1] SALUM, L. J. B. S. **Energia Eficaz**. Belo Horizonte: CEMIG, 2005.
- [2] MOTA, J. F. B.; JÚNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W. Otimização de projetos de eficiência energética do tipo baixa renda via enxame de partículas. In: XI LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2015, São José dos Campos, Brasil.
- [3] XAVIER, J. J. Investimento em Eficiência Energética: um estudo de caso. In: Faculdades Pedro Leopoldo, Dept. de Administração, 2011. **Proceedings: Dissertação de Mestrado**.
- [4] TIOZO, C.; JANNUZZI, G. M. Programas de Eficiência Energética para população baixa renda no Brasil: Análise dos investimentos e do atual processo de avaliação. In: XI LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, 2015, São José dos Campos, Brasil.
- [5] BONABEAU, E.; DORIGO, M.; THERAULAZ, G. **Swarm Intelligence: Form natural to artificial systems**. Oxford University Press, 1999.
- [6] KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle Swarm Optimization. In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE NEURAL NETWORKS, v. 4, p. 1942–1948.
- [7] GOULART, S. V. G. Convênio ECV-007/2004 Eletrobrás/UFSC: **AET n° 03/04 - levantamento da experiência internacional: experiência europeia**. Laboratório de Eficiência Energética em Edificações Engenharia Civil da UFSC. Florianópolis, 2005.
- [8] VÁRIOS AUTORES. **Conservação de Energia: Eficiência Energética de Equipamentos e Instalações**. Universidade Federal de Itajubá, 3ª edição, 2006.
- [9] SWISHER, J.; JANNUZZI, G. DE M.; REDLINGER, R. **Tools and Methods for integrated resource planning: Improving energy efficiency and protecting the environment**. Disponível em: <http://www.uneprioe.org/IRPManual/IRPmanual.pdf>. Acesso em: 15 de maio 2016.
- [10] SWISHER, J.; JANNUZZI, G. DE M. **Planejamento Integrado de Recursos Energéticos: Meio Ambiente, Conservação de Energia e Fontes Renováveis**. Campinas: Editora Autores Associados, 1997.
- [11] JÚNIOR, J. P. S. **Combate ao Desperdício de Energia**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica do Programa de Pós Graduação de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Juiz de Fora, 2005.

- [12] CRISTINA, A. **Políticas para a Promoção da Eficiência Energética na Indústria Portuguesa**. Universidade Nova de Lisboa, 2012. Disponível em: http://run.unl.pt/bitstream/10362/8431/1/Brazao_2012.pdf. Acesso em: 15 de maio de 2016.
- [13] JANNUZZI, G. M. **Aumentando a eficiência nos usos finais de energia no Brasil**. Disponível em: <http://www.fem.unicamp.br/~jannuzzi/documents/unicamp-20anos.pdf>. Acesso em: 14 de maio de 2016.
- [14] GOLDEMBERG, J.; SIQUEIRA PRADO, L. T. **The decline of sectorial components of the world's energy intensity**. *Energy Policy*, v. 54, p. 62–65, 2013. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0301421512009883>. Acesso em: 12 de maio 2016.
- [15] BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME). **Relatório de Atividades do Comitê Gestor dos Indicadores de Eficiência Energética: 2002-2008**. Brasília, 2009.
- [16] VASCONCELLOS, A.; MALHEIRO, T.; ROBOREDO, C.; SCHLISCHTING, M.; GENTIL, W. Análise da Eficiência Elétrica na Baixa Renda: Sistema de Refrigeração. In: VIII CONGRESSO DE INOVAÇÃO TECNOLÓGICA EM ENERGIA ELÉTRICA (CITENEL), 2015.
- [17] PACHECO, R.; ORDÓÑEZ, J.; MARTÍNEZ, G. **Energy efficient design of building: A review**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 16, n. 6, p. 3559–3573, 2012. Disponível em: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032112002286>. Acesso em: 13 de junho de 2016.
- [18] OCAMPO, E. A. B.; ESCOBAR, P. J. C.; LORA, E.E.S. Eficiência Energética em prédios universitários: Estudo de caso do bloco I da Unifei, In: XI LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, São José dos Campos, 2015.
- [19] BRASIL. PROCEL. Resultados Procel 2016. Editorial Procel Info, p. 14, 2016.
- [20] MOTA, J. F. B.; JÚNIOR, I. C.; OLIVEIRA, L. W.; DE SÁ, R. J. Otimização da RCB de Projetos de Eficiência Energética do Tipo Baixa Renda via Ant Colony. In: IEEE/INDUSCON, Juiz de Fora, 2014.

- [21] BRASIL. Procel Info. Disponível em:
<http://www.procelinfo.com.br/main.asp?Team=%7B505FF883-A273-4C47-A14E-0055586F97FC%7D>. Acesso em: 04 de julho de 2016.
- [22] BRASIL. PROCEL. Programa Nacional de Racionalização do Uso dos Derivados do Petróleo e Gás Natural, 2015.
- [23] BRASIL. Procel Info. Disponível em:
<https://www.eletobras.com/elb/data/Pages/LUMIS0389BBA8PTBRIE.htm>. Acesso em: 04 de julho de 2016.
- [24] BRASIL. CONPET. Disponível em:
http://www.conpet.gov.br/portal/conpet/pt_br/conteudo-gerais/conpet.shtml. Acesso em: 04 de julho de 2016.
- [25] BRASIL. ANEEL. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/programa-eficiencia-energetica>. Acesso em: 04 de julho de 2016.
- [26] BRASIL. ANEEL. Procedimentos do Programa de Eficiência Energética (PROPEE), 2013.
- [27] DOS SANTOS, R. E. R.; ASTORGA, O.A.M.; VIEIRA; N. D. B.; DOS REIS, K. F.; HADDAD, J. Análise do Desempenho Energético do Programa de Eficiência Energética (PEE) da Aneel. In: XI LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION. São José dos Campos, 2015.
- [28] BRASIL. Decreto 2.335 de 06 de outubro de 1997. **Diário Oficial da União**. Brasília, 1997.
- [29] BRASIL. Lei 9.991. **ANEEL**. Brasília, 2000.
- [30] ALCÂNTARA, M. V. P.; DAMASCENO, S. M. N.; POMPERMAYER, M. L.; DE BRITO, C. E. B. F.; DOS SANTOS, R. L. Análise Crítica da regulamentação dos programas de eficiência energética regulados pela ANEEL. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. São Paulo, 2009.
- [31] BRASIL. ANEEL. **Manual para Elaboração do Programa de Eficiência Energética**. Brasília, 2008.
- [32] SILVA, J. C.; HADDAD, J.; YAMACHITA, R. A. Análise dos projetos de eficiência energética implementados pelas distribuidoras de energia no Brasil. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. São Paulo, 2009.

- [33] BRASIL. Lei 12.212. **Presidência da República**. Brasília, 2010.
- [34] BRASIL. Ministério de Minas e Energia. **Plano Nacional de Eficiência Energética 2030 – Premissas e Diretrizes Básicas na Elaboração do Plano**. Brasília, 2010.
- [35] STARTOSA, J.; POMPERMAYER, M. L. **Uma questão de foco**. Revista de Eficiência Energética da ANEEL, 1º Edição, Brasília, 2013.
- [36] RODRIGUES, J. R. F.; PAULILLO, G.; AOKI, A. R.; MESNIKI, C. Combate ao desperdício da energia elétrica em unidades consumidoras de baixa renda. In: XVIII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Olinda, Pernambuco, 2008.
- [37] MASCARENHAS, A. C. R. **Avaliação do consumo de energia após a melhoria nas instalações elétricas internas e substituição de lâmpadas em habitações populares**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Salvador, Salvador, 2003.
- [38] ROMANO, A. C.; PINHEL, A. C. Doação de Refrigeradores Eficientes para a população de baixa renda da COELBA. In: XVII SEMINÁRIO NACIONAL DE DISTRIBUIÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. Belo Horizonte, Minas Gerais, 2006.
- [39] JANNUZZI, G. M.; DA SILVA, A. L. R.; DE MELO, C.; PACCOLA, J. Â.; GOMES, R. D. Metodologia para medição e verificação de programas de eficiência energética em comunidades de baixa renda. In: XI CONGRESSO BRASILEIRO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA. São Paulo, 2009.
- [40] CASTRO, L. N. **Fundamentals of Natural Computing: Basic Concepts, Algorithms, and Applications**. Ed. Chapman & Hall/CRC, 2006.
- [41] JUNIOR, I. C. S. **Planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão utilizando um novo algoritmo heurístico construtivo**. Dissertação de mestrado. UFJF, Juiz de Fora, 2003.
- [42] GARVER, L. L. **Transmission Network Estimation Using Linear Programming**. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, v. PAS-89, n. 7, p. 1688-1697, 1970.

- [43] MORAES, C. A. **Planejamento estático da expansão de sistemas de transmissão utilizando a heurística construtiva de mínimo corte de carga e meta-heurística de ecolocalização de morcegos**. Dissertação de mestrado. UFJF, Juiz de Fora, 2015.
- [44] YANG, X. S. **Nature_Inspired Metaheuristic Algorithms**. University of Cambridge, Second Edition, United Kingdom, 2011.
- [45] LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. Editora Ciência Moderna, 3º Edição, p. 13-24, 2012.
- [46] TSAI, C. W.; TSENG, S. P.; CHIANG, M. C.; YANG, C. S. **A Time-Efficient Method for Metaheuristics: Using Tabu Search and Tabu GA as a Case**. In: 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYBRID INTELLIGENT SYSTEMS. Shenyang, China, 2009.
- [47] ORFANOS, G. A.; GEORGILAKIS, P. S.; HATZIARGYRIOU, N. D. A recursive harmony search algorithm for security constrained transmission expansion planning. In: POWERTECH IEEE. Grenoble, França, 2013.
- [48] DORIGO, M.; STUTZLE, T. **Ant Colony Optimization**. Massachusetts: Bradford Books, 2004.
- [49] COELHO, L. S.; NETO, R. F. Colônia de Formigas: Uma Abordagem para Aplicações de Atribuição Quadrática e Projeto de Layout. In: XXIV ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO – ENEGEP. Florianópolis, Santa Catarina, 2004.
- [50] SILVA, D. C. **Colônia de Formigas: Uma abordagem para resolução de problemas de layout**. Dissertação de mestrado. UNICAMP, Campinas, 2014.
- [51] SILVA, E. O. A.; BAHIENSE, C. B.; CASTRO, M. C. **Uma Abordagem Paralela Baseada em Colônia de Formigas para o Problema do Caixeiro Viajante**. Caderno do IME, v. 18, 2005.
- [52] VIANA, F. A. C.; KOTINDA, G. I.; RADE, D. A.; STEFFEN JR, V. **Tuning dynamic vibration absorbers by using ant colony optimization**. Computer and Structures, v. 86, p. 1539-1549, 2008.

- [53] JÚNIOR, E. F. M. O. **Aplicação do algoritmo de otimização por colônia de formigas sobre o problema do passeio do robô seletivo**. Dissertação de Mestrado, UFRN, Natal, 2012.
- [54] JÚNIOR, I. C. S.; NASCIMENTO, F. R.; OLIVEIRA, E. J.; MARCATO, A. L. M.; DIAS, B. H. Programação diária da operação de sistemas termoeletrônicos de geração utilizando otimização bio-inspirada em colônia de formigas. In: SBA CONTROLE E AUTOMAÇÃO, v. 23, nº 3, Campinas, 2012.
- [55] BRANDSTATTER, B.; BAUMGARTNER, U. **Particle swarm optimization – mass-spring systems analogon**. IEEE Transactions on Magnetics, v. 38, p. 997-1000, 2002.
- [56] COELLO, C. A. C.; REYES – SERRA, M. **Multiobjective particle swarm optimizers: a survey of the state-of-the-art**. International Journal of Computational Intelligence Research, v. 2, p. 287- 308, 2006.
- [57] SERAPIÃO, A. B. S. Fundamentos de Otimização por Inteligência de enxames: uma visão geral. In: SBA CONTROLE E AUTOMAÇÃO, v. 20, nº 3, Natal, 2009.
- [58] PARSOPOULOS, K.; VRAHATIS, M. **Recent Approaches to Global Optimization Problems Through Particle Swarm**. Natural Computing1, Kluwer Academic Publishers, p. 232-306, 2002.
- [59] EBERHART, R. C.; SIMPSON, P.; DOBBINS, R. **Computational Intelligence PC Tools**. Academic Press, 1996.
- [60] KENNEDY, J.; EBERHART, J. C.; SHI, Y. **Swarm Intelligence**. San Francisco: Morgan Kaufmann/Academic Press, 2001.
- [61] GROSAN, C.; ABRAHAM, A.; CHIS, M. **Swarm Intelligence in Data Mining**. Studies in Computational Intelligence, v. 3, p. 1-16, 2006.
- [62] FAYYAD, U.; PIATESTKU-SHAPIO, G.; SMYTH, P.; UTHURUSAMY, R. **Advances in Knowledge Discovery and Data Mining**. AAAI/MIT Press, 1996.

- [63] SICILIANO, A. V. Algoritmos Genéticos e Particle Swarm Optimization e suas Aplicações Problemas de Guerra Eletrônica. In: IX SIMPÓSIO DE GUERRA ELETRÔNICA, São José dos Campos, São Paulo, 2007.
- [64] BENTO, M. E. C.; RAMOS, R. A. Projeto de Estabilizadores de Sistemas de Potência para Geradores Síncronos Distribuídos usando Otimização por Enxame de Partículas. In: XI LATIN AMERICAN CONGRESS ELECTRICITY GENERATION AND TRANSMISSION, São José dos Campos, São Paulo, 2015.
- [65] DIAS, B. H.; OLIVEIRA, L. W.; GOMES, F. V.; SILVA, I. C.; OLIVEIRA, E. J. **Hybrid heuristic optimization approach for optimal distributed generation placement and sizing**. 2012 IEEE/PES General Meeting, p.6, 2012.
- [66] ENGELBRECHT, A. P. **Fundamentals of Computation Swarm Inteligence**. Ed. Wiley, 1st ed. 2005.
- [67] KENNEDY, J.; MENDES, R. Population Structure and Particle Swarm Performance. In: IEEE CONGRESS ON EVOLUTIONARY COMPUTATION, p. 1671-1676, 2002.
- [68] VIOT, J. **Otimização por enxame de partículas com congregação passiva seletiva**. Tese de Doutorado. COPEE/UFRJ, Rio de Janeiro, 2010.
- [69] MENDES, R. **Population Topologies and Their Influence in Particle Swarm Performance**. Tese de Doutorado. Universidade do Minho, Braga, Portugal, 1994.
- [70] RATNAWEERA, A.; HALGAMUGE, S. K.; WATSON, H. C. **Self-organizing hierarchical particle swarm optimizer with time-varying acceleration**. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, p. 240-255, 2006.
- [71] KENNEDY, J.; EBERHART, R. C. Particle swarm optimization, In: IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, Perth, Australia, p. 1942-1948, 1995.
- [72] CARLISLE, A.; DOZIER, G. An Off-The-Shelf PSO. In: PARTICLE SWARM OPTIMIZATION WORKSHOP, p. 1-6, 2001.
- [73] AYALA, H. V. H.; COELHO, L. S. Otimização por enxame de partículas de controle de multivariável em uma aplicação de robótica de manipuladores. In: VIII SIMPÓSIO

- BRASILEIRO DE AUTOMAÇÃO INTELIGENTE. Florianópolis, Santa Catarina, 2007.
- [74] ROCHA, L.R.R.; MONTEIRO, M.A.G. **Fupai/Efficientia: gestão energética**. Centrais Elétricas Brasileiras. Eletrobrás, Rio de Janeiro, 2005.
- [75] HADDAD, J. et al. Professores e pesquisadores da Escola Federal de Engenharia de Itajubá. **Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos**. FUPAI, Itajubá, Minas Gerais, 2001.
- [76] XAVIER, J. J. **Investimento em eficiência energética: um estudo de caso**. Dissertação de Mestrado. Faculdades Pedro Leopoldo, Pedro Leopoldo, 2011.
- [77] BRASIL, H.G. **Avaliação moderna de investimentos**. Rio de Janeiro: Ed. Qualitymark, 2002.
- [78] BRASIL. **Manual de Procedimentos de Eficiência Energética**. ANEEL, 2008.
- [79] BRASIL. **Análise econômica de investimento: Guia Básico**. Procel Indústria, 2009.
- [80] BRASIL. **Manual de orientação para elaboração do programa anual de combate ao desperdício de energia elétrica das concessionárias**. ANEEL, 2000.
- [81] CARDOSO, R. B.; NOGUEIRA, L. A. H. Avaliação do impacto energético do uso de lâmpadas fluorescentes compactas no setor residencial brasileiro. In: IX CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANEJAMENTO ENERGÉTICO, Florianópolis, Santa Catarina, 2014.
- [82] LEAL, A. G. **Sistema para determinação de perdas em redes de distribuição de energia elétrica utilizando curvas de demanda típicas de consumidores e redes neurais artificiais**. Tese de doutorado. Escola Politécnica de São Paulo, São Paulo, 2006.
- [83] MOREIRA, L. C. **Perdas em sistemas elétricos de distribuição**. Dissertação de graduação. Universidade de Brasília, Brasília, 2004.

- [84] STRAUCH, M. **Desenvolvimento de metodologia para cálculo de perdas elétricas em redes de distribuição de baixa tensão**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Salvador, Salvador, 2002.
- [85] FILHO, N. C.; KOPITTKKE, B.H. **Análise de investimentos: Matemática Financeira, Engenharia Econômica, tomada de decisão, estratégia empresarial**. São Paulo: Ed. Atlas, 1998.
- [86] BRASIL. **Resolução Homologatória N°1.531**. ANEEL, p. 4-5, 2013.
- [87] BRASIL. **Resolução Homologatória N°1.532**. ANEEL, p. 4-5, 2013.

APÊNDICE A - Dados Econômicos do PEE

A.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste apêndice são apresentados dados econômicos do programa de eficiência energética da ANEEL desde 2008. É fundamental o levantamento desses dados para se ter noção do potencial de ganho possível dentro do programa de eficiência energética em termos econômicos e a possibilidade de investimentos.

A.2 INVESTIMENTOS POR TIPOLOGIA DE PROJETO

Tabela 13 – Investimentos por tipologia do PEE, desde 2008

TIPOLOGIA	INVESTIMENTO
Baixa Renda	R\$2.847.714.862,08
Residencial	R\$515.414.510,17
Poder Público	R\$474.225.360,53
Educacional	R\$232.287.528,39
Comércio e Serviços	R\$150.465.279,32
Serviços Públicos	R\$150.361.542,42
Industrial	R\$100.498.524,39
Aquecimento Solar	R\$74.768.000,65
Projeto Piloto	R\$70.910.372,89
Rural	R\$25.348.117,72
Gestão Energética Municipal	R\$9.629.773,02
Iluminação Pública	R\$4.696.108,65

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

A.3 ONZE MAIORES GRUPOS DE ENERGIA ELÉTRICA EM INVESTIMENTOS DO PEE

Tabela 14 – Investimento do PEE por grupo de concessionárias de energia, desde 2008

GRUPO DE ENERGIA	INVESTIMENTO
CPFL	R\$482.496.294,14
AES Eletropaulo	R\$431.780.980,17
Cemig	R\$401.463.631,61
Light	R\$370.159.503,15
Energisa	R\$306.099.679,82
Copel	R\$276.798.072,81
Coelba	R\$265.008.654,64
Celesc	R\$256.373.338,26
Ampla	R\$206.502.401,17
EDP Bandeirante	R\$169.806.976,79
Elektro	R\$155.798.356,88

Fonte: ELABORADO PELO PRÓPRIO AUTOR, 2016

APÊNDICE B – Detalhamento do cálculo do RCB do Estudo de Caso

B.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Neste apêndice é apresentado um passo a passo do cálculo do RCB do estudo de caso exposto em 4.2.1.

B.2 CÁLCULO DO BENEFÍCIO ANUALIZADO

A formulação geral do benefício anualizado está disposta em (13).

O primeiro passo é calcular os valores dos custos evitado de demanda e de energia economizada da concessionária, aplicando (14) e (15), respectivamente. A aplicação está representada por (B.1) e (B.2).

$$CED = (12.24,41) + (12.29,56.0,4624) = 292,9200 + 164,0230 \quad (B.1)$$

$$= R\$456,9425/kW.ano$$

$$CEE = \frac{(204,64.0,3520) + (204,64.0,2464) + (129,73.1,6825) + (129,73.1,1881)}{0,3520 + 0,2464 + 1,6825 + 1,1881} \quad (B.2)$$

$$= \frac{494,8595}{3,4690} = R\$142,6519/MWh$$

A seguir, calculamos os valores dos benefícios energéticos devido à substituição dos equipamentos. A economia de energia e a redução de demanda na ponta podem ser calculadas de acordo com (19) e (20), respectivamente. A aplicação está representada por (B.3) e (B.4).

$$EE = [(1460.45.3300) + (1460.80.16500) + (8760.26.360) + (1825.30.90)]. 10^{-6} \quad (B.3)$$

$$= [216810000 + 1927200000 + 81993600 + 9927500]. 10^{-6}$$

$$= 2230,93 MWh/ano$$

$$RDP = [(45.3300) + (80.16500) + (26.360) + (30.90)]. 10^{-3} \quad (B.4)$$

$$= [148500 + 1320000 + 9360 + 2700]. 10^{-3} = 1480,56 kW.ano$$

Finalmente podemos calcular o valor do benefício anualizado aplicando a formulação geral (13). O valor do benefício energético do projeto está calculado em (B.5).

$$BA_t = (2230,96.142,6519) + (1480,56.456,9425) = R\$994781,47 \quad (B.5)$$

B.3 CÁLCULO DO CUSTO ANUALIZADO

A formulação geral do custo anualizado está disposta em (9).

O primeiro passo é calcular os valores dos custos dos equipamentos por ano e o valor total do custo com equipamentos, de acordo com (11). A aplicação é representada em (B.6), (B.7), (B.8), (B.9) e (B.10).

$$CE_{FLC15} = 1650.86,99 = R\$143533,50 \quad (B.6)$$

$$CE_{FLC20} = 8250.91,34 = R\$753555,00 \quad (B.7)$$

$$CE_{ref} = 180.2444,63 = R\$440033,40 \quad (B.8)$$

$$CE_{TV} = 45.2808,95 = R\$126402,75 \quad (B.9)$$

$$CE_t = R\$143533,50 + R\$753555,00 + R\$440033,40 + R\$126402,75 \quad (B.10)$$

$$= R\$1463524,65$$

Onde:

CE_{FLC15} é o custo da lâmpada FLC de 15 Watts

CE_{FLC20} é o custo da lâmpada FLC de 20 Watts

CE_{ref} é o custo dos refrigeradores

CE_{TV} é o custo da TV de LED

Em seguida, calculamos os valores do fator de recuperação de capital de cada equipamento aplicando (12). O cálculo está representado em (B.11), (B.12) e (B.13).

$$FRC_{lamp} = \frac{0,08 \cdot (1 + 0,08)^{4,38}}{(1 + 0,08)^{4,38} - 1} = 0,2796 \quad (B.11)$$

$$FRC_{ref} = \frac{0,08 \cdot (1 + 0,08)^{10}}{(1 + 0,08)^{10} - 1} = 0,1490 \quad (B.12)$$

$$FRC_{TV} = \frac{0,08 \cdot (1 + 0,08)^{20}}{(1 + 0,08)^{20} - 1} = 0,1019 \quad (B.13)$$

Onde:

FRC_{lamp} é o fator de recuperação de capital das lâmpadas

FRC_{ref} é o fator de recuperação de capital dos refrigeradores

FRC_{TV} é o fator de recuperação de capital das TV de LED

Em seguida, podemos calcular os valores de custo anualizado por equipamento e o valor do custo anualizado total aplicando (10) e (9), respectivamente. O termo $\frac{CT}{CE_t}$ será igual a 1, para todos os equipamentos. Os cálculos estão demonstrados em (B.14), (B.15), (B.16), (B.17) e (B.18).

$$CA_1 = 143533,50 \cdot 0,2796 = R\$40131,97 \quad (B.14)$$

$$CA_2 = 753555,00 \cdot 0,2796 = R\$210693,98 \quad (B.15)$$

$$CA_3 = 440033,50 \cdot 0,1490 = R\$64564,98 \quad (B.16)$$

$$CA_4 = 126402,75.0,1019 = R\$12880,44 \quad (\text{B.17})$$

$$\begin{aligned} CA_{ano} &= R\$40131,97 + R\$210693,98 + R\$64564,98 + R\$12880,44 \quad (\text{B.18}) \\ &= R\$329271,37 \end{aligned}$$

Por se tratar de um projeto plurianual, devemos corrigir o valor do custo do ano 2, aplicando (22) e de acordo com (B.19).

$$CA_{ano2} = \frac{329271,37}{(1 + 0,08)^{2-1}} = R\$304880,90 \quad (\text{B.19})$$

O valor do custo anualizado total é mostrado em (B.20).

$$CA_t = CA_{ano1} + CA_{ano2} = 329271,37 + 304880,90 = R\$634152,27 \quad (\text{B.20})$$

B.4 CÁLCULO DA RELAÇÃO CUSTO BENEFÍCIO

Diante dos valores do benefício anualizado total e do custo anualizado total, podemos aplicar a formulação geral da relação custo benefício, de acordo com (8). O cálculo é representado por (B.21).

$$RCB = \frac{R\$634152,27}{R\$994781,47} = 0,637 \quad (\text{B.21})$$