

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÃO DE
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
UNIVERSITÁRIA**

ZAIRE DE ASSIS FERREIRA SOUZA

DM:25 /2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ZAIRE DE ASSIS FERREIRA SOUZA

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÃO DE
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
UNIVERSITÁRIA

DM:25 /2018

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

ZAIRE DE ASSIS FERREIRA SOUZA

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÃO DE
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
UNIVERSITÁRIA

Dissertação submetida à Banca
Examinadora do Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Elétrica
da UFPA para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Elétrica
na área de Sistemas de Potência.

UFPA / ITEC / PPGEE
Campus Universitário do Guamá
Belém – Pará – Brasil

2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

UTILIZAÇÃO DE UM SISTEMA DE ARMAZENAMENTO TÉRMICO PARA APLICAÇÃO DE
GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA EM UMA REDE DE DISTRIBUIÇÃO
UNIVERSITÁRIA

AUTOR: ZAIRE DE ASSIS FERREIRA SOUZA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA À AVALIAÇÃO DA BANCA EXAMINADORA
APROVADA PELO COLEGIADO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
ELÉTRICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ E JULGADA ADEQUADA PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA ELÉTRICA NA ÁREA DE SISTEMAS
DE POTÊNCIA.

APROVADA EM ____/____/____

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dra. Carolina de Mattos Affonso
(ORIENTADORA – UFPA)

Prof. Dr. Marcus Vinicius Alves Nunes
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. João Paulo Abreu Vieira
(MEMBRO – UFPA)

Prof. Dr. Raidson Jenner Negreiros de Alencar
(MEMBRO – IFPA)

Visto:

Prof. Dr. Evaldo Gonçalves Pelaes
(COORDENADOR DO PPGE / ITEC / UFPA)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha mãe amada, pela grande dedicação na minha educação e pelos valiosos ensinamentos para a vida. E a Jesus, Pai de bondade e Deus de amor, por estar ao meu lado todos os dias corrigindo meus caminhos e instigando meus pensamentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe, Maria das Graças Souza, por todos os conselhos que me ajudaram a refletir sobre minhas decisões, por todas as vezes que me chamou a atenção a melhorar enquanto pessoa e por todo o amor demonstrado inúmeras vezes ao longo de minha vida.

Agradeço aos irmãos e irmãs da Paróquia de São Sebastião que sempre me ajudaram a entender minha fé, crescer espiritualmente e levar a sério as regras do bem viver em comunidade.

A minha namorada Adeniele Lopes, que sempre esteve ao meu lado, me alegrando nos momentos de tristeza e solidão e compartilhando momentos positivos e negativos da vida.

Agradeço à minha orientadora, professora Carolina de Mattos Affonso, pelo empenho e dedicação com que conduziu este trabalho, pelas orientações acadêmicas e pelos momentos de compartilhamento de experiências e conhecimentos.

A todos os professores e professoras do PPGEE pelos momentos maravilhosos de ensinamento em sala de aula e pelos debates e questionamentos que tanto me ajudaram a crescer intelectualmente.

Aos amigos do LasGrid, Diego Vilar, Jorge Angelim, Marcel Viegas, Helleson Brito, Celivan Vieira, Najmat Branco e Gabriel de Oliveira pelos momentos de descontração no laboratório, pelas muitas experiências trocadas e pela amizade.

Por fim, agradeço a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

CAPITULO 1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVO	4
1.3 REVISÃO DA LITERATURA	4
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO	7
CAPITULO 2 – GERENCIAMENTO DA DEMANDA	8
2.1 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA (GLD)	8
2.2 RESPOSTA A DEMANDA (RD)	9
2.3 TIPOS DE PROGRAMAS DE RESPOSTA A DEMANDA	10
CAPITULO 3 – MODELAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	13
3.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	13
3.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	14
3.2.1 componentes mecânicos	14
3.2.1.1 Condensadores e Evaporadores como Trocadores de Calor	15
3.2.2 Componentes elétricos	17
3.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO	19
3.4 MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO	21
CAPITULO 4 – ALGORITMO GENÉTICO	25
4.1 CONCEITOS DE UM ALGORITMO GENÉTICO	26
4.2 OPERAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO	26
4.2.1 Codificação e Decodificação	27
4.2.2 População inicial	29
4.2.3 Avaliação	29
4.2.4 Seleção via roleta	30
4.2.5 Cruzamento (crossover)	31
4.2.6 Mutação	31
CAPITULO 5 – METODOLOGIA	33
5.1 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE CONSUMIDORA	33
5.2 DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO	37
5.3 COLETA DE DADOS	38
5.4 MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR	41
5.5 TARIFA DE ENERGIA	43
5.6 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA	44
5.7 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO	49
CAPITULO 6 – RESULTADOS	52
6.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO	52
6.2 CRIAÇÃO DOS CENÁRIOS	54

6.3 CASO 1.....	54
6.4 CASO 2.....	57
6.5 CASO 3.....	59
6.6 CASO 4.....	67
6.7 COMPARAÇÃO DOS CASOS	73
CAPITULO 7 – CONCLUSÃO	83
7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	83
7.2 TRABALHOS FUTUROS	84
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Número de conexões por fonte de geração distribuída no Brasil até 23/05/2017. Fonte: (ANEEL, 2017)	2
Figura 1.2 – Potência instalada por fonte de geração distribuída no Brasil até 23/05/2017. Fonte: (ANEEL, 2017)	2
Figura 1.3 – Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial brasileiro. Fonte: (PROCEL, 2007)	3
Figura 1.4 – Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial da Região Norte do Brasil. Fonte: (PROCEL, 2007)	3
Figura 2.1 – Técnicas de gerenciamento de carga. Fonte: (Siebert, Aoki, Yamakawa, & Toledo, 2012)	8
Figura 2.2 – Classificação dos programas de resposta a demanda. Fonte: (Albadi & El-Saadany, 2007) adaptado por (Goulart, 2015).	11
Figura 3.1 – Elementos de um sistema de refrigeração. Fonte: (Rezende, 2012)	14
Figura 3.2 – Evaporador. Fonte: (Tecumseh, 2017)	15
Figura 3.3 – Condensador. Fonte: (Tecumseh, 2017)	15
Figura 3.4 – Tubo Capilar. Fonte: (Tecumseh, 2017)	16
Figura 3.5 – Filtro Secador. Fonte: (Tecumseh, 2017)	16
Figura 3.6 – Compressor hermético rotativo. Fonte: (Tecumseh, 2017)	17
Figura 3.7 – Funcionamento do armazenamento térmico baseado na inércia térmica de edificações. Fonte: (Verbeke & Audenaert, 2018) e (Wang, et al., 2013) adaptado pelo autor. 20	
Figura 3.8 – Representação conceitual do sistema de climatização no modelo de armazenamento de frio. Fonte: (Verzijlbergh & Lukszo, 2013) , adaptado pelo autor.	21
Figura 4.1 – Estrutura em blocos do funcionamento de um AG. Fonte: (Haupt & Haupt, 2004), adaptado pelo Autor.	27
Figura 4.2 – Cruzamento simples de um ponto. Fonte: (Villanueva, 2016).	31
Figura 4.3 – Operador de Mutação. Fonte: (Villanueva, 2016).	32
Figura 5.1 - Mapa do campus universitário do Guamá. Fonte: UFPA, 2011	34
Figura 5.2 – Curva de consumo e demanda de um dia típico. Fonte: (Silva, 2013), modificada pelo Autor.	35
Figura 5.3 – Alguns pavilhões de aula do setor profissional. Fonte: Google Maps. 2018, modificada pelo Autor.	37
Figura 5.4 – Demanda horária dos blocos de aula. Fonte: Autor.	40
Figura 5.5 – Carga térmica dos blocos de aula. Fonte: Autor.	40
Figura 5.6 – Sistema de distribuição do campus universitário do Guamá. Fonte: Autor 41	
Figura 5.7 – Diagrama unifilar dos blocos de aula. Fonte: Autor.	42
Figura 5.8 – Perfil Tarifário da Tarifa Horo-Sazonal Verde. Fonte: Autor.	43
Figura 5.9 – Irradiância média horária para os 12 meses do ano em Belém. Fonte: (Meteotest, 2016), adaptada pelo autor.	45
Figura 5.10 – Temperatura ambiente média horária para os 12 meses do ano em Belém. Fonte: (Meteotest, 2016), adaptada pelo autor.	46
Figura 5.11 – Temperatura ambiente e temperatura dos módulos média anual em 24 horas. Fonte: (Meteotest, 2016), adaptada pelo autor.	46
Figura 5.12 – Irradiância média anual em 24 horas. Fonte: (Meteotest, 2016), adaptada pelo autor.	47
Figura 5.13 – Produção de energia estimada em 24 horas para todos os geradores fotovoltaicos. Fonte: Autor.	47
Figura 5.14 – Metodologia de operação do AG. Fonte: Autor.	49
Figura 5.15 – Estrutura de um cromossomo. Fonte: Autor.	51
Figura 6.1 – Nível de Tensão das barras da rede principal. Fonte: Autor.	52
Figura 6.2 – Acoplamento entre a rede principal e a subrede. Fonte: Autor.	53
Figura 6.3 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 1. Fonte: Autor.	55

Figura 6.4 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 1. Fonte: Autor.	55
Figura 6.5 – Variação horária das perdas da rede para o caso 1. Fonte: Autor.	56
Figura 6.6 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 2. Fonte: Autor.	57
Figura 6.7 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 2. Fonte: Autor.	58
Figura 6.8 – Variação horária das perdas da rede para o caso 2. Fonte: Autor.	58
Figura 6.9 – Topologia sugerida para a rede inteligente. Fonte: Autor.	59
Figura 6.10 – Custo Mínimo encontrado pelo AG em função de cada simulação. Fonte: Autor.	60
Figura 6.11 – Média das simulações para o custo médio e mínimo da função objetivo. Fonte: Autor.	61
Figura 6.12 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 3. Fonte: Autor.	62
Figura 6.13 – Potencia de refrigeração encontrada pelo AG após as 100 simulações. Fonte: Autor.	62
Figura 6.14 – Potência da rede encontrada pelo AG após 100 simulações. Fonte: Autor.	63
Figura 6.15 – Temperatura interna das salas. Fonte: Autor.	64
Figura 6.16 – Calor de entrada e de saída das salas de aula. Fonte: Autor.	65
Figura 6.17 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 3. Fonte: Autor.	66
Figura 6.18 – Variação horária das perdas da rede para o caso 3. Fonte: Autor.	66
Figura 6.19 – Custo Mínimo encontrado pelo AG em função de cada simulação. Fonte: Autor.	68
Figura 6.20 – Média das simulações para o custo médio e mínimo da função multiobjetivo. Fonte: Autor.	68
Figura 6.21 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 4. Fonte: Autor.	69
Figura 6.22 – Potencia de refrigeração encontrada pelo AG após as 100 simulações. Fonte: Autor.	69
Figura 6.23 – Potência da rede encontrada pelo AG após 100 simulações. Fonte: Autor.	70
Figura 6.24 – Temperatura interna das salas. Fonte: Autor.	71
Figura 6.25 – Calor de entrada e de saída das salas de aula. Fonte: Autor.	71
Figura 6.26 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 4. Fonte: Autor.	72
Figura 6.27 – Variação horária das perdas da rede para o caso 4. Fonte: Autor.	72
Figura 6.28 – Fator de demanda para todos os casos. Fonte: Autor.	73
Figura 6.29 – Custo horário da operação dos blocos para todos os casos. Fonte: Autor.	75
Figura 6.30 – Comparação entre os casos 3 e 4 da potência de refrigeração encontrada pelo AG. Fonte: Autor.	75
Figura 6.31 – Comparação entre os casos 3 e 4 da potência da rede encontrada pelo AG. Fonte: Autor.	76
Figura 6.32 – Comparação entre os casos 3 e 4 de temperatura interna das salas. Fonte: Autor.	77
Figura 6.33 – Comparação entre a temperatura ambiente e a temperatura das salas de aula para o caso 3. Fonte: Autor.	78
Figura 6.34 – Comparação entre os casos 3 e 4 do calor de entrada das salas. Fonte: Autor.	79
Figura 6.35 – Comparação entre os casos 3 e 4 do calor de saída das salas. Fonte: Autor.	79
Figura 6.36 – Variação horária da tensão na barra 42 para todos os casos. Fonte: Autor.	80
Figura 6.37 – Variação horária das perdas ativas para todos os casos. Fonte: Autor.	81
Figura 6.38 – Variação horária das perdas reativas para todos os casos. Fonte: Autor.	81
Figura 6.39 – Nível de tensão das barras da rede principal para todos os casos. Fonte: Autor.	82
Figura 6.40 – Nível de tensão da barra 42, representada pelo número 113 na ordem crescente de barras para todos os casos. Fonte: Autor.	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1: Parâmetros do Modelo Físico. Fonte: (Verzijlbergh & Lukszo, 2013) e (Verbeke & Audenaert, 2018).....	24
Tabela 5-1: Levantamento da demanda e do consumo médio diário. Fonte: (Silva, 2013)	36
Tabela 5-2: Lista de unidades consumidoras monitoradas. Fonte: (Silva, 2013)	36
Tabela 5-3: Características do transformador instalado no pavilhão. Fonte: (Bezerra & Tostes, 2012).	37
Tabela 5-4: Potência instalada nos blocos. Fonte: (Bezerra & Tostes, 2012) modificado pelo autor.	38
Tabela 5-5: Relação dos condicionadores de ar nos ambientes. Fonte: Autor.	39
Tabela 5-6: Tarifa Horo-Sazonal Verde para o Subgrupo A4 – Poder Público. Fonte: (CELPA, 2018)	44
Tabela 5-7: Parâmetros do Sistema Solar Fotovoltaico. Fonte: Autor.....	48
Tabela 5-8: Dados da simulação. Fonte: Autor.....	51
Tabela 6-1: Cenários de Simulação. Fonte: Autor.	54
Tabela 6-2: Parâmetros de simulação do AG para o caso 3. Fonte: Autor.	60
Tabela 6-3: Parâmetros de simulação do AG para o caso 4. Fonte: Autor.	67
Tabela 6-4: Resumo dos cenários apresentados. Fonte: Autor.	74

RESUMO

A presente dissertação propõe o gerenciamento ótimo da demanda de refrigeração de uma rede de distribuição universitária para promover maior economia e eficiência energética utilizando a inércia térmica de salas de aula climatizadas como elemento armazenador de energia térmica e geração fotovoltaica. O método proposto considera a variação horária da temperatura ambiente influenciando a variação da temperatura interna das salas de aula e o consumo de energia ao longo do dia, sabendo que a unidade consumidora é tarifada no modelo Horo-Sazonal Verde. A análise das cargas da unidade consumidora leva a concluir que a maior parte da energia consumida é destinada a algum tipo de carga de refrigeração, sobretudo a climatizadores de ambiente, assim, considerar a gestão deste tipo de cargas no contexto das redes inteligentes (*Smart Grids*) é uma maneira coerente de impactar positivamente no aumento da eficiência energética. O gerenciamento pelo lado da demanda é realizado com base em Algoritmo Genético e os resultados comprovam a eficácia do método proposto em equilibrar o gerenciamento energético e promover um aumento considerável na economia com os gastos de energia.

Palavras-chave: Gerenciamento pelo Lado da Demanda. Resposta à Demanda. Redes Elétricas Inteligentes. Armazenamento Térmico. Geração Fotovoltaica. Algoritmo Genético.

ABSTRACT

The present dissertation proposes the optimal management of the refrigeration demand of a university distribution network to promote greater economy and energy efficiency using the thermal inertia of air-conditioned classrooms as storage element of thermal energy and photovoltaic generation. The proposed method considers the hourly variation of the ambient temperature influencing the variation of the internal temperature of the classrooms and the consumption of energy throughout the day, knowing that the consumer unit is charged in the green model. The analysis of the loads of the consumer unit leads to the conclusion that most of the energy consumed is destined to some kind of refrigeration load, especially to ambient air conditioners, thus, to consider the management of this type of loads in the context of intelligent networks is a coherent way of positively impacting on increasing energy efficiency. Demand side management is based on Genetic Algorithm and the results prove the effectiveness of the proposed method in balancing the energy management and promoting a considerable increase in the economy with the energy expenses.

Key words: Demand Management Side. Demand Response. Smart Grids. Thermal Storage. Photovoltaic Generation. Genetic Algorithm.

CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

1.1 MOTIVAÇÃO

Com o advento da internet das coisas (do inglês, *Internet of Things - IoT*), os conceitos da informática se tornaram muito mais presente em carros, eletrodomésticos, prédios, residências e não somente nos sistemas de informação/comunicação. Porém esta transformação ainda não conquistou os sistemas de distribuição de energia elétrica em sua plenitude (XU, YU, *et al.*, 2017). Apesar dos sistemas de informação, comunicação e automação existirem há bastante tempo, somente nos últimos anos passou-se a discutir com maior profundidade a necessidade de coletar e processar informações em tempo real e automatizar a tomada de decisão na distribuição de energia elétrica. Este aparente atraso do setor elétrico em incorporar as tecnologias de informação de forma ampla, não se trata de uma resistência do setor as novas tecnologias ou à viabilidade econômica das trocas em larga escala, mas ao fato de que o sistema de distribuição funciona muito bem no mundo analógico (RIGODANZO, 2015). Por outro lado, a popularização de algumas tecnologias, como a geração distribuída de fontes renováveis e os veículos elétricos, por exemplo, juntamente com os novos anseios da sociedade civil organizada, como a priorização de soluções sustentáveis e mais eficientes, trazem desafios que só poderão ser superados mediante uma mudança, mesmo que gradual, de todo o sistema de energia elétrica. Neste contexto surgiu o conceito de *Smart Grids* ou Redes Elétricas Inteligentes.

Na Europa, o crescimento das fontes renováveis trouxe grandes benefícios, como a redução substancial da utilização de combustível fóssil. Porém a gestão do recurso energético ficou mais complexa devido à sazonalidade das fontes renováveis, já que são fontes não despacháveis, em sua maioria, como é o caso da fonte solar e eólica (CAÑIZARES e PALMA-BEHNKE, 2014). Assim, a utilização de sistemas de armazenamento conectados à rede em conjunto com a geração distribuída, vem se tornando cada vez mais importante no sentido de viabilizar um maior controle sobre a fonte renovável (HERNÁNDEZ, 2015).

No Brasil, o número de geradores distribuídos conectados à rede de distribuição ainda representa uma pequena parcela da capacidade instalada no país, porém este percentual tem crescido consideravelmente nos últimos anos. A fonte renovável com maior representatividade nos sistemas de distribuição, sem dúvida, é a fonte solar fotovoltaica que representa cerca de 99 % do número total de instalações e 70 % de toda a potência instalada (ANEEL, 2017) como mostram as Figuras 1.1 e 1.2. Nota-se uma grande diferença entre o número de conexões da fonte solar fotovoltaica (10.453 conexões) em comparação com o segundo lugar pertencente à energia eólica com 50 conexões.

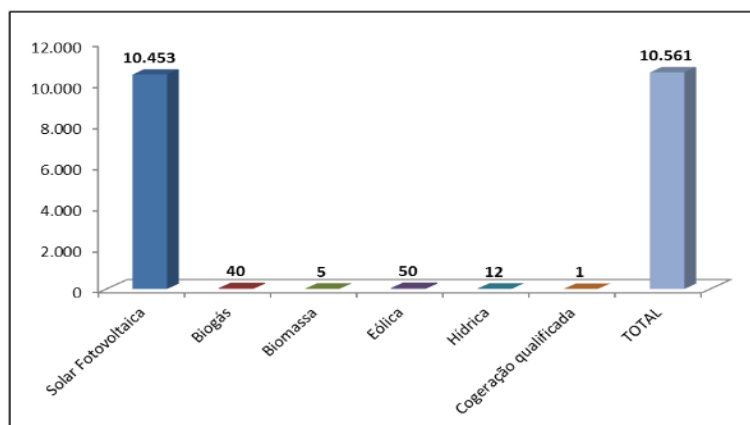


Figura 1.1 – Número de conexões por fonte de geração distribuída no Brasil até 23/05/2017.
Fonte: (ANEEL, 2017)

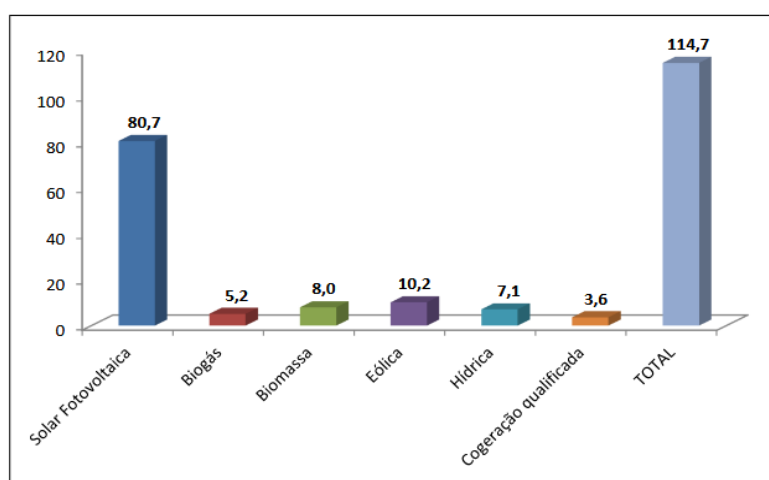


Figura 1.2 – Potência instalada por fonte de geração distribuída no Brasil até 23/05/2017.
Fonte: (ANEEL, 2017)

Conforme estudo desenvolvido pelo PROCEL em 2005 que analisou os hábitos de consumo de energia elétrica dos brasileiros, 47% da energia destinada às residências correspondem a sistemas de refrigeração, como indica a Figura 1.3. De maneira mais detalhada, 22% correspondem às geladeiras, 20% a sistemas de condicionamento de ar e 5% a Freezers (PROCEL, 2007). Já na região norte do Brasil, os aparelhos de condicionamento de ar representam cerca de 40% de toda energia consumida, como mostra a Figura 1.4, por se tratar de uma região de clima quente e húmido. Assim, soluções energéticas que consideram esta peculiaridade apresentam maior potencial de utilização do recurso energético de forma mais eficiente.

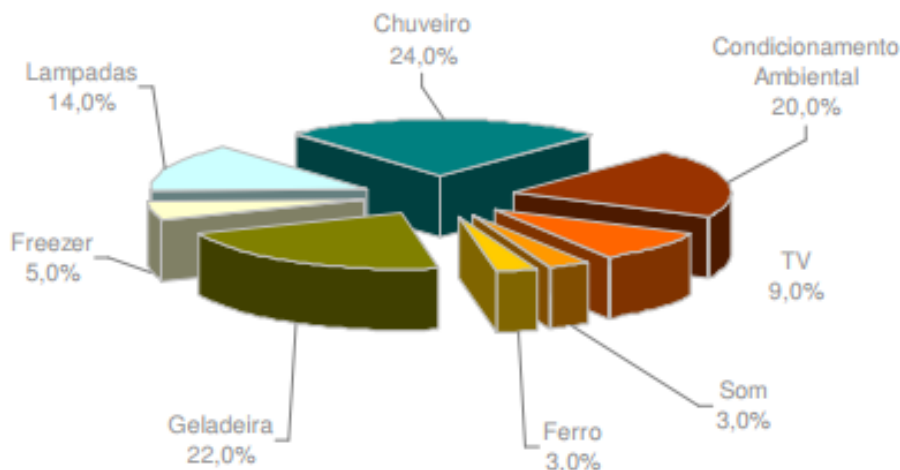


Figura 1.3 – Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial brasileiro.
Fonte: (PROCEL, 2007)

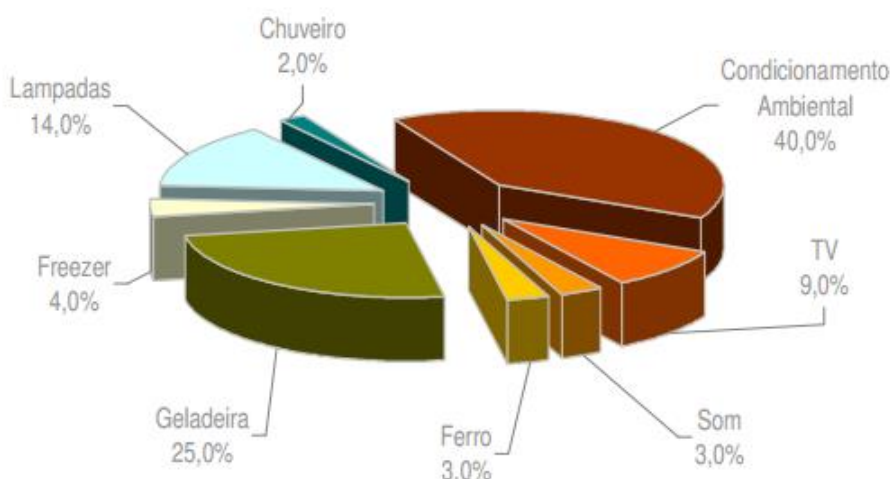


Figura 1.4 – Participação dos eletrodomésticos no consumo residencial da Região Norte do Brasil.
Fonte: (PROCEL, 2007)

Com o crescimento da geração distribuída, veículos elétricos e sistemas de armazenamento surgem os conceitos relacionados ao gerenciamento da energia pelo lado da demanda (GLD), pois neste cenário de mudanças, a gestão energética não deve continuar centralizada (CAÑIZARES e PALMA-BEHNKE, 2014). No Brasil, as iniciativas práticas visando o GLD estão em crescimento, porém muitas ainda em etapas de projeto piloto. Uma das alterações regulatórias recentes foi a possibilidade do consumidor em baixa tensão optar pela tarifa horária branca disponibilizada a partir do dia 1ª de janeiro de 2018 (CELPA, 2018), o que já era permitido para consumidores do Grupo A (atendidos em Alta Tensão). Este tipo de mudança é importante não pela simples aplicação da tarifa horária em si, mas por exigir uma maior modernização dos sistemas de medição e maiores detalhamentos no tratamento da informação proveniente das unidades consumidoras.

Antes, contudo, para que seja possível o gerenciamento da energia em uma rede inteligente, alguns requisitos precisam ser adotados como:

- 1) medição eletrônica, que será responsável pela interface entre os equipamentos dos consumidores e o sistema elétrico;
- 2) tarifas diferenciadas ao longo do dia, desestimulando o uso de equipamentos em momentos indesejáveis para o sistema elétrico;
- 3) o equipamento a ser gerenciado deve ter potencial energético e técnico para tal, sem provocar transtornos e prejuízos para o usuário e para a função principal de cada dispositivo (NIRO, 2011).

No contexto Brasileiro, tanto o primeiro como o segundo requisito estão se consolidando com as mudanças que vem ocorrendo no setor. Já o terceiro requisito pode ser atendido utilizando estratégias de gerenciamento de energia em aparelhos de condicionamento de ar domésticos. Seu potencial técnico deve-se a inércia térmica das edificações onde estes se encontram, isto permite que eles sejam desligados por determinado espaço de tempo sem prejudicar sua operação normal.

1.2 OBJETIVO

Esta dissertação tem como objetivo apresentar uma metodologia para implantação e otimização do gerenciamento da energia pelo lado da demanda utilizando um sistema de armazenamento térmico juntamente com um gerador fotovoltaico. O método de otimização proposto é o Algoritmo Genético. A resposta à demanda é realizada através da ferramenta de planejamento criada, a qual considera tarifa de energia variável de acordo com o período do dia, visando refletir situações típicas de fornecimento e demanda de energia como é o caso da tarifa horo-sazonal verde, regulada em 2011 pela ANEEL. O sistema teste utilizado é um sistema real, representativo de um campus universitário da Universidade Federal do Pará (UFPA), que possui diversos sistemas de climatização de ambientes. A principal contribuição desta dissertação é propor uma técnica de otimização que considere o benefício da inércia térmica das edificações como forma de armazenamento virtual de energia para redução da demanda da carga local e do custo energético, por meio de um controle local, sendo sua implementação mais viável na prática.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

Diversos trabalhos têm sido publicados nos últimos anos mostrando possibilidades de aplicação do gerenciamento pelo lado da demanda com a utilização de algoritmos de otimização e elementos armazenadores de energia para o referido fim. Em Niro (2011) o autor utilizou a inércia e o isolamento térmico de refrigeradores domésticos para implementar um GLD que controlava os horários para ligar e desligar os refrigeradores. Foi desenvolvido um modelo de refrigeradores agrupados em alimentadores de distribuição para se realizar simulações computacionais e, com isso,

reduzir a demanda do sistema no horário de pico e amenizar as perdas técnicas da rede em estudo. Como resultado, melhorias no perfil de tensão foram observadas.

Em Halvgaard, *et al.* (2012) os autores utilizaram o sistema de bombeamento de água quente para aquecimento de pisos nos países nórdicos, como carga controlável usada em uma estratégia de resposta a demanda. Durante os horários fora de pico, a água é aquecida e bombeada para aquecer o piso. Porém, nos horários de pico, o sistema de aquecimento fica desligado completamente e a manutenção da temperatura do piso se dá por sua própria inércia térmica, ou o sistema é ligado rapidamente em alguns instantes para garantir o conforto térmico. O gerenciamento é feito utilizando técnicas de controle preditivo visando à redução da energia importada da rede elétrica, consideraram-se modelos de tarifa dinâmica ajustada ao longo do dia. Os resultados mostraram uma redução da energia consumida da rede elétrica de até 25% nos cenários mais críticos

Foi desenvolvido em Holanda, *et al.* (2012) um sistema de climatização eficiente e de baixo custo para atender a pequenas cargas térmicas. Os autores usaram compressores *scroll* trocadores de calor feitos com radiadores e ventiladores automotivos, e um tanque de armazenamento de 19.000 litros embutido na terra para melhorar o isolamento térmico. Foram realizados testes em uma instituição pública do nordeste do Brasil e verificou-se que a utilização do armazenamento térmico reduziu cerca de 70 % da carga térmica total apresentando níveis promissores de eficiência térmica. Além disso, desenvolveu-se um sistema simples de automação industrial capaz de aplicar diferentes estratégias de gerenciamento energético.

Em Vanthournout, *et al.* (2012) os autores mostram a viabilidade técnica do armazenamento térmico em uma aplicação de resposta à demanda. No trabalho foi proposto o conceito de estado de carga térmico (SOC térmico) para tanques de armazenamento de água quente em comparação ao estado de carga de baterias eletroquímicas. Para aplicações que envolvem calor, como aquecedores e chuveiros elétricos, o armazenamento térmico apresentou menor custo por kW armazenado em comparação com as baterias elétricas.

As ciências dos materiais também possuem papel fundamental no desenvolvimento de soluções eficientes de armazenamento térmico, como em John, *et al.* (2013) onde os autores desenvolveram um sistema de armazenamento térmico em estruturas de concreto utilizado em usinas de geração solar térmica a fim de garantir o despacho em momentos de menor irradiância solar. Verificou-se que os sistemas convencionais de armazenamento térmico suportam em média até 400°C enquanto que o sistema desenvolvido de concreto consegue suportar temperaturas de até 600°C com uma capacidade térmica suficiente para reduzir o custo médio de armazenamento de \$15,00/kWh para cerca de \$1,00/kWh.

Diversas estratégias de GLD são apresentadas em Alcântara, *et al.* (2013), visando sua aplicação no setor elétrico brasileiro para melhoria da eficiência energética. Das estratégias apresentadas destaca-se a utilização de tarifas variáveis para consumidores atendidos em alta e baixa tensão, visando redução de demanda no horário de pico e melhor ajuste do perfil de demanda ao perfil de geração dos clientes que possuem geração própria conectada à rede de distribuição. Os autores também utilizam a

ferramenta computacional MATLAB/Simulink para mostrar um aumento considerável na flexibilidade da curva de demanda de diversos consumidores, realizando somente a gestão do consumo de refrigeradores domésticos.

Em Douglass, *et al.* (2013) os autores utilizaram refrigeradores comerciais, do tipo expositores, para auxiliar no gerenciamento da frequência de uma rede dotada de um grande nível de geração eólica. Como o controle de frequência é realizado de modo central e os expositores se encontravam na rede de distribuição secundária, foi necessário desenvolver uma infraestrutura de comunicação e controle entre os refrigeradores e o controle central. Os refrigeradores foram tratados como cargas inteligentes capazes de modificar a potência consumida a fim de regular a frequência da rede sem comprometer a refrigeração dos alimentos.

Em Wang, *et al.* (2013) os autores propuseram dois modelos com diferentes níveis de complexidade para representação da resistência térmica das paredes das salas de uma residência inteligente, a fim de investigar os benefícios da utilização da inércia térmica das salas. Visando maximizar o conforto e minimizar custos, os autores usaram técnicas de programação linear pensando em cenários de operação via monitoramento em tempo real da temperatura das salas. A análise computacional mostrou que o modelo mais detalhado manteve o desempenho térmico com os climatizados ligando menos frequentemente, portanto, reduzindo custos.

Outro tema que vem ganhando destaque é a utilização de geradores fotovoltaicos para o atendimento integral ou parcial de cargas de refrigeração. Em Huang, *et al.* (2016) foi desenvolvido um sistema de geração fotovoltaica isolado, dedicado ao atendimento de centrais de condicionamento de ar. Os autores utilizaram um banco de baterias com o controlador de carga e um inversor para realizar a interface entre o gerador fotovoltaico e o banco de baterias com o sistema de ar condicionado. Também foi necessária a utilização de capacitores de partida durante o acionamento do compressor. Foi realizado um estudo de caso para climatização de uma sala de 28m² e a inércia térmica da sala foi utilizada para auxiliar na redução da profundidade de descarga do banco de baterias, mostrando que o armazenamento térmico pode ser usado em conjunto com o armazenamento eletroquímico tanto para melhorar a eficiência global do sistema isolado, quanto para otimizar a eficiência do armazenamento eletroquímico.

Em Luo, *et al.* (2017) os autores descrevem como armazenadores de frio (como refrigeradores domésticos, comerciais e centrais de climatização) podem ser usados como cargas inteligentes para o controle rápido da tensão e auxílio no gerenciamento pelo lado da demanda em sistemas de potência dotados de muitas fontes renováveis e intermitentes, enquanto mantêm a função de flexibilizar a curva de carga, isto é, reduzir o desbalanceamento natural através da compensação de potência ativa e reativa. Foram realizadas diversas simulações computacionais em redes conectadas e isoladas, baseadas em uma solução eletrônica proposta pelos autores para gestão das cargas térmicas. Baseado nos resultados observados, a utilização da inércia térmica dos armazenadores de frio se mostrou promissora, tanto para controle dos distúrbios de tensão, como para gestão da curva de carga.

O desenvolvimento de um laboratório de testes com um sistema de refrigeração central dotados de refrigeradores comerciais de diferentes fabricantes e com diferentes

temperaturas de trabalho foi apresentado por Saleh, *et al.* (2018) onde os autores, a fim de avaliar quais os impactos causados, de forma prática, na rede elétrica disponível para alimentação destas cargas. Após realizar uma série de medições, foi possível obter várias relações entre potência ativa e corrente drenada pelos compressores e temperatura de operação e pressão do sistema de refrigeração, mostrando que não há prejuízo para as funções dos refrigeradores. Porém, foi mostrado um impacto prejudicial considerável na eficiência de operação do sistema de refrigeração mediante distúrbios de frequência e tensão da rede. Além disso, foi observado o aparecimento de correntes de inrush nos transformadores de alimentação do sistema de refrigeração sempre que a estratégia de resposta à demanda reconectava os compressores à rede.

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A presente dissertação possui sete capítulos estruturados para contextualização, apresentação e discussão acerca da proposta de trabalho desenvolvida.

O capítulo 1 apresenta a motivação do trabalho, quais objetivos se pretende alcançar e uma breve revisão da literatura a respeito do tema.

O capítulo 2 apresenta todos os conceitos que serão discutidos e aprofundados no decorrer da dissertação como: gerenciamento pelo lado da demanda, resposta a demanda, armazenamento térmico e redes elétricas inteligentes.

No capítulo 3 são apresentados alguns padrões de consumo dos brasileiros e como esse padrão influencia na modelagem de sistemas de armazenamento térmico. São mostrados de forma mais detalhada, os componentes que constituem um sistema de refrigeração físico, bem como a interpretação matemática destes mesmos sistemas e da inércia térmica de edificações.

No capítulo 4 são apresentados os principais conceitos sobre o método de otimização algoritmo genético.

O capítulo 5 mostra todas as informações a respeito do sistema teste e a construção da metodologia empregada na dissertação. São mostradas as concepções acerca da construção dos cenários para aplicação do GLD no contexto das redes inteligentes.

No capítulo 6 são apresentados todos os resultados das simulações e algumas discussões importantes.

Por fim, o capítulo 7 expõem todas as conclusões.

CAPITULO 2 – GERENCIAMENTO DA DEMANDA

2.1 GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA (GLD)

O gerenciamento pelo lado da demanda (do inglês *Demand Side Management - DSM*) é o planejamento e implantação de atividades para influenciar a utilização de eletricidade do consumidor, de modo a proporcionar mudanças necessárias na curva de carga da concessionária de energia (ALCÂNTARA, DA SILVA e GERALDI, 2013). Utilizar técnicas de GLD para a gestão de carga possibilita entre outros benefícios o alívio da rede em horários de pico.

Visando flexibilizar a gestão de carga e o aumento da eficiência global da utilização de recursos da rede, podem-se classificar seis objetivos distintos do GLD, como mostrado na Figura 2.1: redução de pico, preenchimento de vales, deslocamento de carga, conservação estratégica de carga, crescimento estratégico de carga e curva de carga flexível (GELLINGS, 1985).

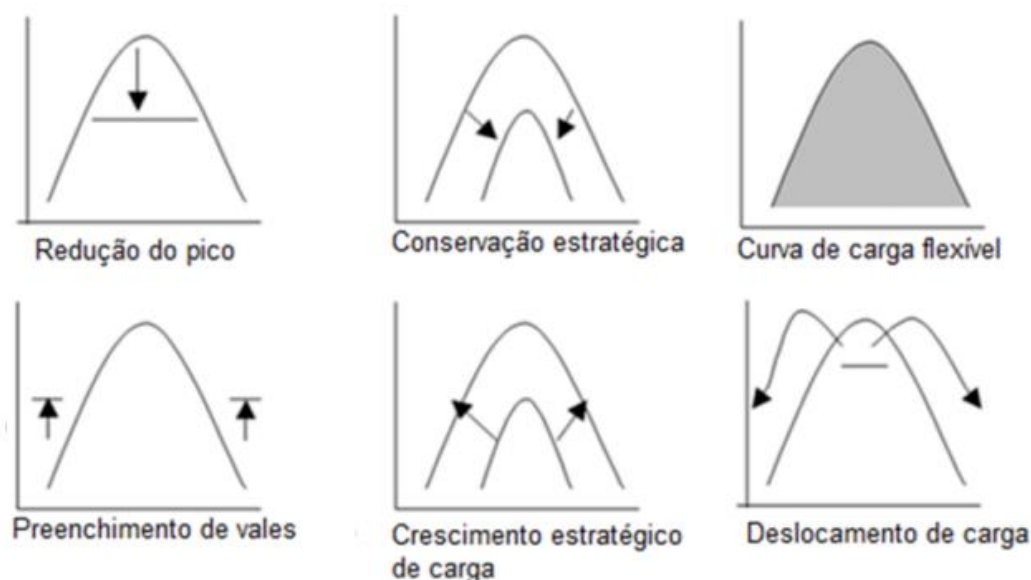


Figura 2.1 – Técnicas de gerenciamento de carga. Fonte: (SIEBERT, AOKI, *et al.*, 2012)

Redução de pico (do inglês, *Peak Clipping*) é uma das formas mais clássicas de gerenciamento de carga. Também conhecida como corte de pico, é considerada como a redução do(s) pico(s) de carga usando controle direto. Este controle direto é mais comumente praticado através dos aparelhos dos usuários da rede, porém, este controle pode partir do usuário ou da concessionária (pensando em medição inteligente). É considerada uma operação muito invasiva, porém proporciona redução de custos operacionais e da dependência de combustíveis fósseis, em matrizes com baixa penetração de fontes renováveis ou em momentos de descasamento crítico entre carga e geração.

Preenchimento de vales (do inglês, *Valley Filling*) é utilizada para diminuir a diferença entre o período de pico e o fora deste, e assim, amortizar a curva de carga do

consumidor, melhorando seu fator de carga e consequentemente reduzindo custos de energia. Seu efeito é especialmente observado em períodos do ano onde o custo marginal supera o custo médio.

Deslocamento de carga (do inglês, *Load Shifting*) como o próprio nome sugere, estimula a mudança de carga do horário de pico para períodos fora de pico. Para usa-la com melhor eficiência, sugere-se o deslocamento de cargas de maior impacto no consumo, como o chuveiro elétrico ou refrigeradores domésticos, por exemplo.

Conservação estratégica de carga (do inglês, *Strategic Conservation*) trate-se da substituição de aparelhos de uso final por modelos mais eficientes, com objetivo de reduzir a curva de carga como todo. Porém, na implementação desta modalidade, a empresa de energia deve considerar que essa conservação ocorreria naturalmente com o tempo. Portanto, deve-se realizar um estudo para julgar se o custo-benefício é válido.

Crescimento estratégico da carga (do inglês, *Strategic Load Growth*) é a mudança na curva de carga por meio do crescimento das vendas de energia em geral. Estimulada pelas empresas de energia através do incentivo a substituição de equipamentos baseados em combustíveis fósseis por elétricos (ex: veículos elétricos) e redução da tarifa, além da estratégia de preenchimento de vales, descrito anteriormente.

Curva de carga flexível (do inglês, *Flexible Load Shape*) é uma relação realizada entre concessionária e consumidor, onde este aceita o controle de sua carga, por meio de cortes, redução da qualidade da energia fornecida, ou a integração de sistemas de gerenciamento de energia com forte restrição no uso de dispositivos, em troca de benefícios financeiros.

O GLD agrega dentro de seu conceito diferentes ações para o gerenciamento de carga incluindo tarifas variáveis, uso racional de energia, armazenamento energético, eficiência energética (tanto por ações da concessionária quanto por ações do consumidor) e resposta a demanda.

2.2 RESPOSTA A DEMANDA (RD)

Os programas de resposta à demanda podem ser definidos como estudos realizados e direcionados a fim de atingir um ou mais objetivos de um processo de gerenciamento da demanda de energia (MURATORI e RIZZONI, 2016).

Desta forma, antes de se elaborar um programa de resposta à demanda, a empresa ou órgão responsável por sua implantação deverá definir quais são os objetivos desejados com este processo. Neste processo é importante conhecer bem o perfil de consumo ao qual se deseja atingir com o programa e avaliar se as atitudes tomadas terão o retorno previsto. Contudo, deve-se atentar que programas de resposta à demanda devem considerar outros fatores, como a conservação de carga, a modernização de equipamento, como medidores, e até mesmo os incentivos e propagandas do programa.

Para programas de resposta a demanda que preveem um controle dos equipamentos de grande consumo instalados nas unidades consumidoras seja de classe residencial, comercial ou industrial, como por exemplo, ar-condicionados, aquecedores de ambiente, fornos elétricos e bombas em geral, deve-se avaliar o melhor

método de controle além da aplicabilidade deste método ao cliente em questão (GOULART, 2015).

A geração distribuída, por exemplo, pode ser considerada um programa de resposta à demanda, desde que seja conduzida pela própria empresa de energia de forma integrada, sendo despachada remotamente em períodos convenientes, de forma a deslocar a curva de demanda do sistema central.

Existem também os programas de resposta à demanda aplicada ao incentivo de consumo junto ao consumidor. Anteriormente, o Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica – PROCEL, ANEEL e o Governo do Estado em parceria com algumas distribuidoras promoveu um programa oferecendo descontos para os consumidores que substituíssem sua geladeira, ar condicionado e máquinas de lavar antigas por produtos mais novos com selo de eficiência de consumo. Para isso, o consumidor deveria entregar o eletrodoméstico antigo no ato da aquisição do produto novo. Atualmente, a iniciativa mais recente foi do programa piloto de resposta da demanda desenvolvido pela câmara de comercialização de energia elétrica (CCEE), criado com o objetivo de reduzir o consumo de agentes consumidores previamente habilitados, como recurso alternativo ao despacho termelétrico fora da ordem de mérito, conforme estabelece a Resolução Normativa ANEEL nº 792, de 28 de novembro de 2017 (“REN nº 792/2017”), que terá vigência de 1º de janeiro de 2018 até 30 de junho de 2019 (CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018). No entanto, os programas de resposta à demanda mais utilizados são os baseados em tarifa. Estes programas consistem na definição de um valor de tarifa diferenciado em função do custo da energia em determinado horário. A aplicação de programas de tarifa diferenciada é bem difundida em diversos países e sua aplicação normalmente alcança o objetivo do programa.

2.3 TIPOS DE PROGRAMAS DE RESPOSTA A DEMANDA

Nesta dissertação optou-se por considerar a classificação mostrada em Albadi & El-Saadany (2007) e adaptada por Goulart (2015) que divide os programas de resposta à demanda em dois tipos: Resposta a Demanda com Base em Incentivos (do inglês *Incentive based*) e Resposta à Demanda com Base em Tarifas (do inglês *Price based*). A Figura 2.2 apresenta uma divisão mais detalhada desta classificação.

Os programas de resposta à demanda baseado em incentivos são aqueles que envolvem algum tipo de incentivo, normalmente de fundo financeiro na adesão ao programa. São baseados em arranjos contratuais que envolvam descontos na conta ou no pagamento antecipado e benefícios a consumidores participantes, feitos normalmente entre estes e a concessionária de distribuição de energia elétrica ou permissionárias ou ainda operadores de redes.

Programas de resposta à demanda baseados em incentivos são aplicados como solução para situações em que a segurança e estabilidade do sistema elétrico estejam comprometidas ou os custos da geração de energia em curto prazo estejam em valores elevados comprometendo a modicidade político-tarifária. Nestes programas, o estudo do

perfil de consumo de cada cliente é feito com base na média de seus últimos registros de consumo e, é determinado um montante ou um percentual de redução sobre esta média.



Figura 2.2 – Classificação dos programas de resposta a demanda. Fonte: (ALBADI e EL-SAADANY, 2007) adaptado por (GOULART, 2015).

A participação do consumidor neste tipo de programa é, muito frequentemente, voluntária, e caso o consumidor não cumpra o compromisso acordado de redução ou desligamento de sua carga quando acionado pela outra parte, sofrerá sanções na forma de multa.

Conforme a divisão mostrada na Figura 2.2, os programas de resposta à demanda baseados em incentivo se dividem em programas clássicos e programas relacionados ao mercado. Nos programas clássicos os consumidores recebem incentivos financeiros que variam desde desconto em sua fatura de energia mensal a créditos de energia para consumo, como pagamento antecipado. As duas modalidades do programa clássico se dão via controle direto de carga ou por programas de interrupção. Em programas de controle direto de carga, o operador do sistema possui gerenciamento sobre as cargas dos consumidores consideradas interrompíveis, conectadas diretamente ao sistema, tais como bombas d'água, sistemas de aquecimento de água, sistemas de ar-condicionado, entre outros. Assim, tendo um sistema inteligente (*Smart Grid*) de controle de consumo, a concessionária, ou o operador do sistema, pode desligar de forma automática tais sistemas e equipamentos, com autorização prévia do consumidor. Já os programas interruptivos se assemelham aos de controle direto de carga, estando a principal diferença no processo de acionamento do corte. Para este, o valor do montante a ser reduzido é previamente definido, e deve ser acatado pelo consumidor independentemente do tipo de carga a ser desligada. Para isso, o consumidor é solicitado por meio através de um sistema de comunicação estável previamente acordado, a reduzir seu consumo.

Por outro lado, os programas de resposta à demanda relacionada ao mercado, são financeiramente mais agressivos. Nestes programas, os consumidores participantes, ao

atingirem as metas, são normalmente recompensados com dinheiro. Um exemplo deste tipo de programa é o leilão de redução de demanda. Este programa funciona como um leilão onde o consumidor oferta um montante de redução do seu consumo para a empresa de distribuição e caso sua oferta esteja abaixo ou dentro do valor de mercado e inferior aos demais ofertantes, poderá ser aceita pela empresa. Este programa é normalmente usado por grandes consumidores que, dependendo do preço do mercado atacadista, preferem trabalhar com curvas de carga elásticas conforme processo de formação de preço do mercado.

Outro programa relacionado ao mercado é a resposta à demanda de emergência, que trabalha com a filosofia de redução da demanda em caso de emergência sistêmica. Neste caso a empresa prestadora de serviço remunera os clientes por redução de energia medida quando da necessidade de corte de carga. O valor desta redução é pré-estabelecida em estudo e limitada ao mínimo funcionamento de cada consumidor, no entanto a solicitação de redução é emergencial. A adesão ao programa por parte do consumidor é opcional e a redução voluntariada.

Nos programas de Mercado de Capacidade, as mesmas condições da resposta à demanda de emergência são oferecidas aos clientes, no entanto, a solicitação de redução é feita com um dia de antecedência.

Um último programa com base em incentivos relacionado ao mercado é o mercado de serviços ancilares. Este programa atua assim como os serviços ancilares prestados atualmente, onde o conectante participante do programa é remunerado pela capacidade de reserva e pela provisão de energia. Estes programas também costumam ser embasados e tipos de leilão onde o ofertante oferece seus serviços.

Os programas baseados em incentivos já são implementados em países da Europa, Estados Unidos e Canadá. No Brasil, o único modelo existente de programas de resposta à demanda e baseados em tarifas, que são baseados na ideia de que os consumidores, frente ao preço da tarifa, alteram seu perfil de consumo. Diferente dos programas de resposta à demanda baseados em incentivos, os programas de resposta à demanda baseados em tarifa não preveem uma intervenção direta da concessionária de distribuição ou do operador do sistema. Este tipo de programa fornece ao consumidor um sinal tarifário de forma que o mesmo possa ajustar o seu consumo, deslocando parte de sua carga de consumo para horários onde a energia seja mais barata, ou mesmo desligando equipamentos em determinados horários, obtendo assim uma flexibilização da curva de consumo favorável para ambas as partes, mas sempre mantendo o consumidor no controle do seu consumo.

CAPÍTULO 3 – MODELAGEM DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Para análise dos impactos e possíveis benefícios que o gerenciamento de climatizadores de ambiente (ar condicionados e centrais de ar) pode proporcionar ao sistema elétrico, é necessário definir um modelo que descreva adequadamente o seu funcionamento (NIRO, 2011). Para tanto, adotou-se um modelo que contemple sua dinâmica térmica, adaptado de Wang, *et al.* (2013) e LUKSZO & VERZIJLBERGH (2013), o qual será apresentado a seguir.

3.1 PRINCÍPIOS DE FUNCIONAMENTO DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Atualmente existem inúmeros produtos comerciais destinados a aumentar o conforto, segurança e adequação de ambientes às condições impostas pelos seus usuários ou equipamentos. Apesar disso, os princípios que regem o funcionamento desses produtos são similares. Basicamente, os equipamentos utilizam os mesmos tipos de componentes elétricos e mecânicos, variando somente quanto à forma, capacidade e dispositivos de controle e proteção, em função de sua capacidade ou importância (NIRO, 2011).

A Figura 3.1 mostra os elementos responsáveis pelo fenômeno da refrigeração, sendo que, um ciclo de refrigeração completo, passa por todos os componentes. O ciclo de refrigeração tem início com o compressor, que aspira o gás refrigerante do evaporador à baixa pressão. O gás é comprimido, aumentando assim a sua pressão e a temperatura, e posteriormente é enviado ao condensador. No condensador, o vapor refrigerante é transformado em líquido refrigerante por convecção (natural ou forçada), cedendo o calor ao meio ambiente. O líquido refrigerante a alta pressão deixa o condensador e, atravessando o filtro, penetra no tubo capilar (ou válvula de expansão, dependendo do equipamento), que por sua vez funciona como um dispositivo regulador de refrigerante e produz a queda de pressão necessária para o evaporador. O gás líquido chega ao evaporador e em virtude do grande espaço, perde pressão, vaporizando-se e absorvendo o calor latente do espaço refrigerado.

A transferência de calor do espaço refrigerado para o condensador, e deste para o meio ambiente exterior, é obtido através de um agente refrigerante que pode ser água, álcool, amônia, bióxido de carbono, anidrido sulfuroso, éter metílico, cloreto de metila e outros, muito embora alguns desses frigorigêneos apresentem vantagens e desvantagens.

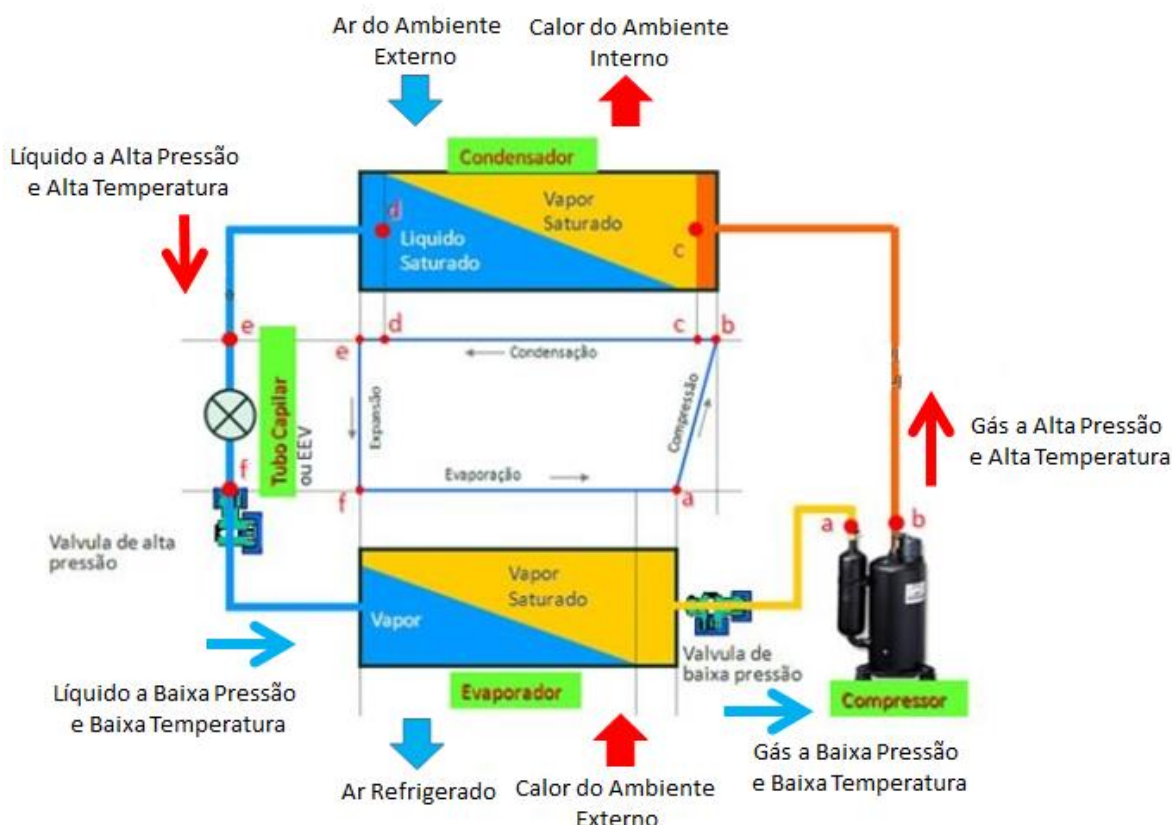


Figura 3.1 – Elementos de um sistema de refrigeração. Fonte: (REZENDE, 2012)

3.2 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

Os componentes de um sistema de refrigeração tanto para uso em refrigeradores ou em condicionadores de ar são basicamente os mesmos. A seguir são descritas as principais unidades mecânicas e elétricas deste sistema.

3.2.1 COMPONENTES MECÂNICOS

Em aparelhos de refrigeração de pequeno porte, as partes mecânicas são três: o condensador, o evaporador e o compressor. Este último é acoplado a um motor elétrico. Outros componentes importantes são o filtro secador e o tubo capilar, que dependendo da aplicação final do equipamento pode ser substituído por uma válvula de expansão. . Estas unidades, juntamente com uma série de controles, constituem o sistema de refrigeração e possibilitam a construção de equipamentos residenciais e também de grande capacidade térmica.

A seguir serão listados os principais componentes de acordo com Tecumseh (2017).

3.2.1.1 Condensadores e Evaporadores como Trocadores de Calor

O condensador e o evaporador são superfícies de troca de calor. A função do evaporador é absorver calor latente de vaporização do espaço refrigerado, enviando-o, através do compressor, ao condensador para que seja eliminado, através de troca com o meio ambiente. A Figura 3.2 mostra um evaporador de uma central de ar condicionado e a Figura 3.3 mostra o condensador da mesma central.



Figura 3.2 – Evaporador. Fonte: (TECUMSEH, 2017)



Figura 3.3 – Condensador. Fonte: (TECUMSEH, 2017)

A estrutura de evaporadores e condensadores em refrigeradores e condicionadores de ar é praticamente a mesma, diferenciando-se somente no material de fabricação. Em refrigeradores utiliza-se o alumínio enquanto que em condicionadores de ar é utilizado o cobre.

3.2.1.2 Tubo Capilar

O tubo capilar é feito de cobre e possui dimensões reduzidas sendo utilizado no lado de alta pressão. Sua função é regular a quantidade de fluido refrigerante que chega ao evaporador através de seu reduzido diâmetro, que por sua vez, em função de seu comprimento, causa a queda de pressão necessária, dividindo o sistema em duas seções de pressão: o lado de alta e o lado de baixa pressão.



Figura 3.4 – Tubo Capilar. Fonte: (TECUMSEH, 2017)

3.2.1.3 Filtro Secador

Este exerce duas funções importantes: a primeira é a de reter partículas sólidas que, em circulação no circuito, podem ocasionar obstrução ou danos às partes mecânicas do compressor; e a segunda, é absorver totalmente a umidade residual do circuito que porventura não tenha sido removida pelo processo de vácuo, evitando danos ao sistema como formação de ácidos, corrosão, aumento das pressões e obstrução do tubo capilar por congelamento da unidade.



Figura 3.5 – Filtro Secador. Fonte: (TECUMSEH, 2017)

3.2.1.4 Compressores

O compressor pode ser considerado como o coração de um sistema de refrigeração. Ele é o responsável pelas transformações físicas que ocorrem no fluido refrigerante, transformações estas que culminam no fenômeno da refrigeração. Sua função é succionar e impulsionar o gás refrigerante para que possa circular no sistema. Essa parte é constituída basicamente por uma parte elétrica e uma parte mecânica. Nos compressores de pequeno porte, pode encontrar-se em uma mesma unidade, formando os compressores herméticos. Nos equipamentos de maior capacidade as partes elétricas e mecânicas são montadas separadamente, embora possuam acoplamento mecânico, sendo conhecidos como compressores semi-herméticos ou abertos. Grande parte das

aplicações de pequeno porte como refrigeradores, freezers, bebedouros e aparelhos de ar-condicionado residencial utilizam compressores do tipo hermético.



Figura 3.6 – Compressor hermético rotativo. Fonte: (TECUMSEH, 2017)

3.2.2 COMPONENTES ELÉTRICOS

Neste tópico serão descritos os principais componentes elétricos utilizados em equipamentos de refrigeração de pequeno porte.

3.2.2.1 Motor Elétrico do Compressor

O motor elétrico do compressor é do tipo indução, com rotor em gaiola de esquilo. O rotor e o estator encontram-se diretamente fixados no eixo e no corpo da bomba do compressor. Ele é responsável pela transformação da energia elétrica em energia mecânica no eixo do motor. Construtivamente, o motor do compressor é formado por dois enrolamentos: um principal ou de marcha e outro auxiliar ou de partida. Este último podendo permanecer ou não conectado ao circuito, dependendo da finalidade de uso do compressor. Para uso em refrigeradores, o enrolamento de partida, normalmente, atua somente na partida do motor do compressor, sendo desligado após atingir-se o regime permanente. Já para utilização em condicionadores de ar, por tratar-se de equipamentos de maior porte, normalmente tal enrolamento permanece conectado em série com um capacitor.

3.2.2.2 Relé de Partida Eletromagnético

O relé de partida do compressor hermético é um dispositivo utilizado em unidades de pequena capacidade, tais como pequenos refrigeradores domésticos. Este componente se apresenta com os contatos normalmente abertos. A bobina do relé de

partida é ligada em série com o enrolamento principal do compressor, que, devido ao valor elevado da corrente de partida, origina um campo magnético que atrai a armadura, fechando o contato e conectando o enrolamento auxiliar. Quando o motor atinge a rotação de serviço, a corrente diminui gradativamente até o momento em que o campo magnético não tem força para manter a armadura atracada. Dessa forma, a armadura, pela ação da gravidade, desce, abrindo os contatos e consequentemente desconectando a bobina de partida do motor.

3.2.2.3 Relé de Coeficiente de Temperatura Positivo – PTC

O relé PTC é um dispositivo semicondutor formado por uma pastilha de material cerâmico, utilizado na partida de unidades de refrigeração. Esse possui a propriedade de aumentar a resistência elétrica, quando aquecido, devido ao aumento da corrente que passa através dele. Durante a partida do motor, o PTC está frio e com baixa resistência elétrica, consequentemente, conduz corrente através da bobina de partida, fazendo o motor girar. Essa corrente irá aquecê-lo, fazendo com que a resistência aumente e a corrente através da bobina de partida diminua, até se tornar praticamente nula. Seu uso é recomendado para freezers e refrigeradores domésticos, onde o tempo entre os ciclos de operação é suficiente para o PTC esfriar e permitir nova partida.

3.2.2.4 Relé Voltimétrico

Usado normalmente em equipamentos de médio porte, em que estão presentes capacitores de partida e capacitores permanentes no esquema de ligação do motor, o relé voltimétrico possui os contatos normalmente fechados. A bobina do relé é ligada em paralelo com a bobina auxiliar do compressor. A tensão na bobina do enrolamento auxiliar aumenta com o aumento da velocidade do motor, até atingir o valor específico de “pick-up”. Neste ponto, a armadura do relé é atraída, abrindo os contatos do relé e desconectando o capacitor de partida do circuito. Após a abertura, a tensão induzida na bobina de partida é suficiente para continuar atraindo a armadura e manter os contatos de relé abertos.

3.2.2.5 Protetor Térmico Bimetálico

Este componente é ligado em série com o circuito que alimenta o motor. É fixo e encostado à cabeça do compressor, atuando, quando requerido, para abrir o circuito e desligando rapidamente o compressor na presença de qualquer aumento anormal de temperatura ou de corrente, ocasionados por problemas mecânicos, elétricos ou por aplicação inadequada. Um disco bimetálico (dentro do protetor), sensível a excesso de temperatura e/ou corrente, flexiona, abrindo os contatos em série com o disco que, com o seu aquecimento, auxilia a abertura dos contatos em situações de aumento excessivo da corrente elétrica.

3.2.2.6 Capacitor

Este dispositivo, conectado em série com o enrolamento auxiliar, tem por objetivo produzir defasagens entre os campos magnéticos principal e auxiliar, de modo a favorecer o processo de partida. Tal componente se faz presente de duas formas. Um capacitor de partida e um permanente. Em caso de necessidade de torque de partida elevado, conforme se faz necessário em sistemas não auto-equalizados, utiliza-se um capacitor em série com a bobina auxiliar ou de partida. Este aumenta a corrente na bobina durante a partida causando, conseqüentemente, consideráveis aumentos de torque. O capacitor atua somente na partida, sendo desconectado pelo relé quando o motor atinge rotação normal de funcionamento. O capacitor permanente é projetado para atuar continuamente, em série com a bobina de partida, melhorando o torque de partida, o torque de regime e a eficiência elétrica do motor. Este esquema de ligação é aplicado aos sistemas auto-equalizados.

3.3 ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Um sistema térmico de armazenamento de energia (STAE) é um dispositivo que pode armazenar energia térmica na forma de resfriamento, aquecimento, fusão, solidificação ou vaporização de um material. É chamado de armazenador de calor sensível quando a temperatura do material aumenta ou diminui e armazenador de calor latente quando ocorre mudança no estado físico do material. Uma categoria um pouco mais distante é a do armazenador de calor termoquímico, quando um processo é baseado em uma reação química reversível, em que há energia demandada em uma direção e energia produzida na direção reversa. Podem ser utilizadas diferentes substâncias, como óleos, sais fundidos, água, gelo para STAE de calor sensível, parafina e sal hidratado para STAE de calor latente. Eles são escolhidos de acordo com determinados critérios, como o período base de armazenamento requerido, a temperatura de operação e a viabilidade econômica (DINÇER e ROSEN, 2011).

Os STAE retêm temporariamente a energia para sua utilização posterior e pode ser aplicado em diferentes situações. Em um programa de GLD, o STAE pode ser utilizado para gerenciar a carga elétrica de uma edificação modificando a demanda por calor ou frio do período de ponta para o período fora de ponta. De fato, durante o período fora de ponta, o calor ou frio pode ser gerado utilizando energia elétrica e então armazenado em um STAE para ser utilizado durante o horário de pico e com isso melhorar o perfil de carga dos consumidores (ARTECONI, HEWITT e POLONARA, 2012). Uma aplicação similar ocorre em grandes clientes, que possuem cargas maiores e precisam de soluções mais eficientes por representar maior economia durante sua utilização. Muitos clientes desse tipo possuem sistema de tarifação energético diferenciado com preços de tarifas diferentes para os horários de ponta e fora de ponta. Com uma melhor distribuição de carga e com menor consumo no horário de ponta a economia pode ser muito interessante ao consumidor final. Tal situação adquire maior importância quando energias renováveis, sobretudo as de carácter não firmes, como

eólica ou solar estão contribuídos fortemente no perfil desses consumidores (ARTECONI, HEWITT e POLONARA, 2012).

O armazenamento de energia térmica pode ocorrer retirando o calor do meio armazenador, o que caracteriza um armazenamento a frio (AETF), ou acumulando calor no meio armazenador, chamado de armazenamento de calor (AETQ). Nesta dissertação será utilizado o armazenamento a frio, o qual é amplamente utilizado em diversas aplicações. E, basicamente, pode ser realizado por meio do aproveitamento da inércia térmica de um tanque de armazenamento externo ou considerando a inércia térmica natural da edificação. O AETF fornece capacidade de refrigeração por meio da extração de calor de um meio armazenador. Tipicamente, água gelada, gelo ou sais eutéticos e podem ser acoplados ao sistema de ar condicionado para melhorar a eficiência dos equipamentos de refrigeração e consequentemente, reduzir os custos energéticos. O frio é produzido durante os períodos fora de pico e utilizado depois quando a eletricidade é mais cara. Além disso, o tamanho do sistema de refrigeração pode ser reduzido já que a carga média é menor devido à redução do pico da carga térmica. Contudo, armazenadores de frio aumentam a flexibilidade operacional dos sistemas de condicionamento de ar, satisfazendo uma grande quantidade de resfriamento demandado por uma carga. A Figura 3.7 ilustra o armazenamento promovido pela inércia térmica de uma sala climatizada, o que já se consideraria uma estratégia associada a pequenas cargas térmicas. O processo convencional de expulsão de calor de ambientes se utiliza da resistência térmica natural das paredes da edificação climatizada para armazenar energia térmica temporariamente, enquanto se dá a troca de calor entre o ambiente externo e interno.

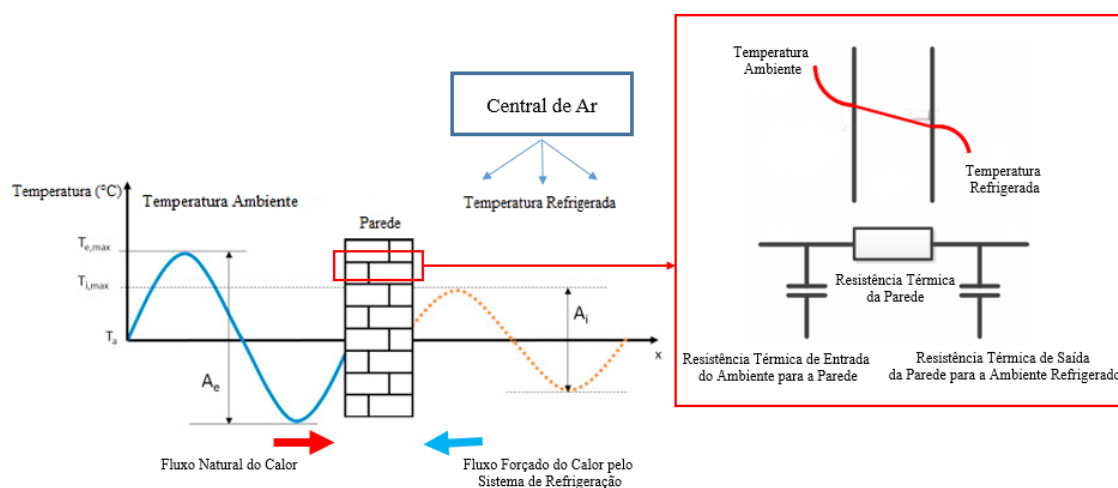


Figura 3.7 – Funcionamento do armazenamento térmico baseado na inércia térmica de edificações.

Fonte: (VERBEKE e AUDENAERT, 2018) e (WANG, MENG, *et al.*, 2013) adaptado pelo autor.

Neste trabalho, avaliou-se a utilização de salas de aula climatizadas como elemento armazenador de frio, sem a necessidade de se utilizar tanques de armazenamento externo, semelhante ao modelo apresentado na Figura 3.7.

3.4 MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO

O sistema de armazenamento de frio dos climatizadores é composto pelos próprios climatizadores de ar, modelados por um compressor hermético acionado por motor elétrico de tal forma a aumentar a pressão em determinada fase de seu ciclo termodinâmico, tal qual foi apresentado nos itens acima e pela inercia térmica do ambiente refrigerado.

O modelo físico de refrigeração adotado para os climatizadores de ar foi apresentado em VERZIILBERGH & LUKSZO (2013), e a Figura 3.8 ilustra seu funcionamento. Na Figura 3.8, T_c é a temperatura relacionada ao fluxo de calor para o ambiente climatizado, é a temperatura ambiente, Q_{in} é o calor de entrada no ambiente climatizado e Q_{out} é o fluxo de calor resultante na saída devido ao sistema de refrigeração mecânico. A equação (3.1) representa o balanço energético no sistema de refrigeração, onde C_p representa a capacidade térmica total do sistema de armazenamento de frio, que no caso é o interior de um ambiente climatizado, que neste trabalho, serão as salas de aula.

$$C_p \frac{dT_c}{dt} = Q_{in} - Q_{out} \quad (3.1)$$

A capacidade térmica da sala depende da densidade do ar (d_c), da área do piso da sala (A_c), da altura da sala (h_c) e do calor específico do ar (C_{pa}) como na equação (3.2).

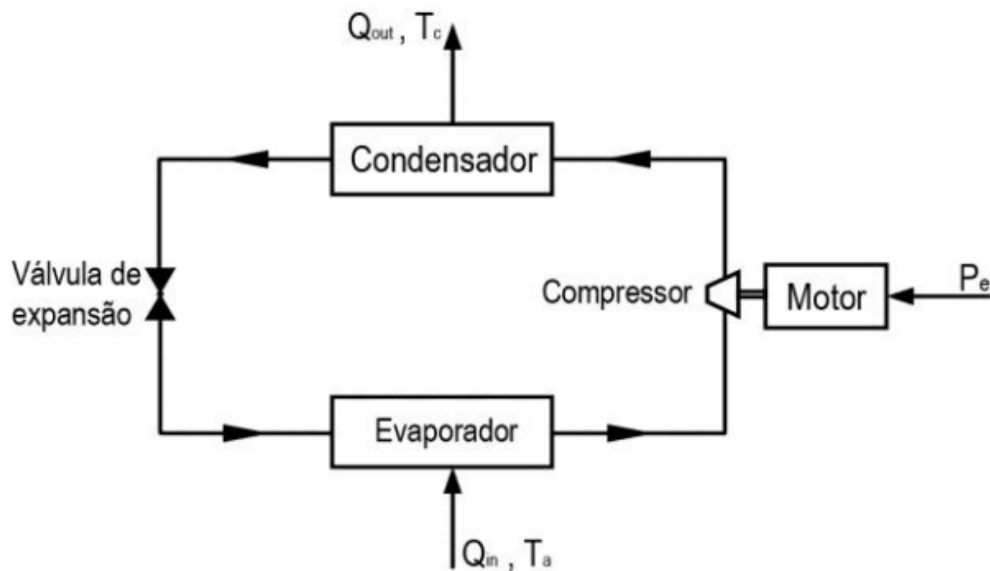


Figura 3.8 – Representação conceitual do sistema de climatização no modelo de armazenamento de frio.
Fonte: (VERZIILBERGH e LUKSZO, 2013) , adaptado pelo autor.

$$C_p = d_c A_c h_c C_{pa} \quad (3.2)$$

O fluxo de calor de entrada é proporcional à diferença de temperatura entre o ambiente climatizado, isto é, a sala de aula, e o ambiente externo, sendo obtido pela equação (3.3).

$$Q_{in} = UA(T_a - T_c) \quad (3.3)$$

Na equação (3.3), UA é o coeficiente de transferência de calor no tempo com a área do tanque. Este coeficiente simula a inércia térmica do ambiente, ou seja, a capacidade do mesmo de manter a temperatura constante, dificultando a troca de calor, sobretudo nos momentos de baixo consumo energético. A diferença de temperatura entre a sala climatizada e o ambiente externo precisa ser convertida de °C para K (Kelvin). A equação 3.4 mostra que o coeficiente de transferência de calor depende da área das paredes da sala (A_p), da área do teto (A_T), da resistência total de transferência de calor das paredes (RT') e da resistência total de transferência de calor do teto (RT'') que estão apresentados nas equações (3.5) e (3.6) respectivamente.

$$UA = 4 \left(\frac{A_p}{RT'} \right) + \frac{A_T}{RT''} \quad (3.4)$$

$$RT' = R_{SI(parede)} + R_{SE} + R_{EQ} \quad (3.5)$$

$$RT'' = R_{SI(teto)} + R_{SE} + R_{EQ} \quad (3.6)$$

Onde $R_{SE(parede)}$ é a resistência superficial externa da parede; $R_{SE(teto)}$ é a resistência superficial externa do teto; R_{SI} é a resistência superficial interna da sala de aula e R_{EQ} é a resistência equivalente da parede de cada sala, considerando as camadas de reboco, argamassa e tijolo. O detalhamento da equação (3.4) foi realizado conforme indicado em (NIRO, 2011) e (KREITH e BOHN, 2003).

Considerando a eficiência de compressão constante, o coeficiente de desempenho COP relaciona a potencia de refrigeração consumida pelo motor da central de ar P_{refri} com o fluxo de calor de saída como na equação (3.7).

$$Q_{out} = P_{refri} \cdot COP \quad (3.7)$$

Combinando-se as equações (3.2), (3.3), (3.4) e (3.7) em (3.1) tem-se:

$$d_c A_c h_c C_{pa} \frac{dT_c}{dt} = \left[4 \left(\frac{A_p}{RT'} \right) + \frac{A_T}{RT''} \right] (T_a - T_c) - P_{refri} COP \quad (3.8)$$

Discretizando a equação (3.8) no tempo, pode-se reescrevê-la da seguinte forma:

$$T_c[k+1] = (1-a)T_c[k] + aT_a[k] - bP_{refri}[k] \quad (3.9)$$

Onde a e b são obtidos conforme as equações (3.10) e (3.11).

$$a = \frac{\left[4 \left(\frac{A_p}{RT'} \right) + \frac{A_r}{RT''} \right] \Delta t}{d_c A_c h_c C_{pa}} \quad (3.10)$$

$$b = \frac{COP \Delta t}{d_c A_c h_c C_{pa}} \quad (3.11)$$

Cada termo da equação (3.9) tem um significado físico. O primeiro termo a esquerda representa a energia térmica inicial do sistema, o segundo termo representa o calor do ambiente externo fluindo para dentro do ambiente climatizado e o terceiro termo representa a potencia de refrigeração fluindo para o ambiente externo a fim de manter a temperatura agradável. A Tabela 3.1 mostra alguns dos parâmetros considerados para representação do modelo físico estudado.

Algumas considerações foram feitas para modelagem correta do sistema de armazenamento térmico envolvendo os climatizadores de ambiente e a inercia térmica das salas de aula. Considerou-se que a temperatura do ambiente externo variou ao longo do dia, portanto, foi considerado o impacto desta variação no desempenho do modelo. Além disso, vale ressaltar que o referido modelo matemático (baseado no comportamento físico), assim como qualquer outro modelo possui algumas limitações que estão enumeradas a seguir:

1. A capacidade térmica da sala refrigerada depende do calor específico do ar no interior da mesma. Porém, este calor específico depende da temperatura da sala. Como a temperatura da sala varia de acordo com a operação de sistema, então o calor específico também varia. Entretanto, para simplificar o modelo, esta variação não foi considerada.
2. Sabe-se que a troca de calor ocorre de forma diferente em telhados, paredes e solos. No entanto, considera-se que a troca de calor ocorre de forma uniforme em toda a sala.
3. O coeficiente de desempenho de refrigeração também varia de acordo com a mudança da diferença de temperatura entre a sala refrigerada e o ambiente externo. Porém, para fins de simplificação, manteve-se este coeficiente constante.
4. Não se considerou a capacidade térmica das paredes na modelagem do armazenador de frio, mas somente a capacidade térmica do ar contido nas salas.

Tabela 3-1: Parâmetros do Modelo Físico. Fonte: (VERZIJBBERGH e LUKSZO, 2013) e (VERBEKE e AUDENAERT, 2018)

Parâmetro	Descrição	Valor	Unidade
d_c	Densidade do ar	1,225	kg/m^3
A_c	Área do piso da sala	36	m^2
A_T	Área do teto da sala	36	m^2
A_p	Área da parede da sala	30	m^2
h_c	Altura da sala	3.5	m
C_{pa}	Calor específico do ar	0,27912	kWh/kgK
$R_{SI(\text{parede})}$	Resistência superficial externa da parede	130	$\frac{\text{m}^2}{\text{K/kW}}$
$R_{SI(\text{teto})}$	Resistência superficial externa do teto	170	$\frac{\text{m}^2}{\text{K/kW}}$
R_{SE}	Resistência superficial interna da sala	40	$\frac{\text{m}^2}{\text{K/kW}}$
R_{EQ}	Resistencia equivalente da parede (argamassa, reboco e tijolo)	216,2	$\frac{\text{m}^2}{\text{K/kW}}$
Δt	Taxa de amostragem dos sinais temporais	0.17	h
COP	Coeficiente de desempenho de refrigeração	3	-

CAPITULO 4 – ALGORITMO GENÉTICO

O algoritmo genético (AG) é uma técnica de busca e otimização baseada em princípios de genética e seleção natural. O AG permite que uma população composta por diversos indivíduos, evolua sobre algumas regras de seleção específicas a fim de maximizar ou minimizar um determinado objetivo (i.e, maximizar ou minimizar uma função custo). O método foi desenvolvido por John Holland (1975) entre os anos de 1960 e 1970 e popularizado por um de seus estudantes, David Goldberg, quem utilizou para resolver um problema complexo envolvendo o controle da transmissão de gás por um gasoduto, em sua dissertação (GOLDBERG, 1989). O trabalho original de Holland contém a primeira tentativa de estabelecer um modelo teórico através de um teorema. Desde então uma série de versões de computação evolucionária tem sido testada com uma variedade de graus de sucesso.

Algumas das vantagens do AG incluem (HAUPT e HAUPT, 2004):

- 1 É capaz de otimizar variáveis contínuas ou discretas;
- 2 Não requer informação secundária do problema;
- 3 Realiza buscas simultâneas em uma superfície de custo com muitas amostras;
- 4 Trabalha bem com um grande número de variáveis;
- 5 Se adequa bem em computação paralela;
- 6 Otimiza variáveis em superfícies de custo com grande complexidade (pode pular por mínimos locais);
- 7 Fornece uma lista de soluções otimizadas e não somente uma solução;
- 8 Pode codificar as variáveis e otimizá-las codificadas;
- 9 Pode trabalhar com dados numéricos gerais, dados experimentais ou funções analíticas.

Essas vantagens são intrigantes e apresentam resultados impressionantes para os problemas nos quais os métodos tradicionais falham.

O algoritmo para otimização do GLD em redes inteligentes precisa ser capaz de lidar com uma grande quantidade de cargas, dos mais diversos tipos, e com características de consumo que se propagam no tempo. Métodos de programação linear ou dinâmica não são adequadas nesse contexto, o que qualifica abordagens evolucionárias como uma opção interessante para resolver esse problema (LOGENTHIRAN, SRINIVASAN e SHUN, 2012). O algoritmo desenvolvido nesta dissertação apresenta heurísticas que se adaptam facilmente ao problema, e proporciona soluções práticas eficientes. O emprego de um algoritmo evolucionário permite certa flexibilidade com relação à modelagem do problema, e em função disso é possível utilizar ferramentas que proporcionam um maior conforto aos consumidores no momento de escolher os horários desejáveis de uso dos seus equipamentos. Isso é realizado considerando-se o conforto térmico e o benefício econômico haja vista que as cargas deslocadas são unicamente cargas de refrigeração.

4.1 CONCEITOS DE UM ALGORITMO GENÉTICO

O AG é uma técnica bioinspirada, por isso apresenta alguns conceitos que são muito próprios da biologia. Os conceitos fundamentais de uma AG são basicamente: Gene, Cromossomo, Indivíduo, População, Função Aptidão e Geração (GOLDBERG, 1989).

O **gene** corresponde à representação de uma característica ou parâmetro. Eles podem possuir valores representados em binários, inteiros, reais, nó de uma árvore, ou por outras estruturas de dados. O valor de um gene é conhecido como alelo, no caso de um gene codificado em binário, os alelos são os valores 0 ou 1 (LINDEN, 2012).

O **cromossomo** é composto por um conjunto de genes, sendo representado por uma estrutura de dados que codifica uma possível solução de um problema. Os cromossomos são geralmente representados por vetores de valores binários, inteiros ou reais. De forma semelhante, **indivíduo** é geralmente representado por um cromossomo, e por isso são tratados muitas vezes como sinônimos. Um indivíduo é uma solução candidata para um problema de otimização. Neste trabalho, um indivíduo é representado por uma curva de operação das barras de carga de uma rede de distribuição. O valor da adaptação do indivíduo é definido após o mesmo ser submetido à avaliação por uma função de aptidão (LINDEN, 2012).

A **função de aptidão** é utilizada para mensurar quanto um indivíduo presente em uma população encontra-se adaptado ao objetivo atual, por isso, esta função deve refletir, matematicamente os objetivos que precisam ser alcançados na resolução do problema (LINDEN, 2012). Ao longo da dissertação, os termos função objetivo, função avaliação e função custo também serão utilizados como sinônimos.

A **população** é o conjunto inicial de indivíduos que vão se modificando a cada geração a fim de se adaptar ao objetivo do problema. Esta modificação se dá por meio de operadores genéticos que serão tratados a seguir. É muito comum que a população inicial de determinado problema seja formada aleatoriamente e à medida que os operadores genéticos atuam nesta população a cada geração, esta se modifica para alcançar o objetivo e se chegar ao indivíduo melhor adaptado, isto é, a solução ótima.

Por fim, o conceito de **geração** em um AG é de estado atual em que se encontra a população no processo de evolução (HAUPT e HAUPT, 2004). A primeira geração se refere à primeira população, à medida que os indivíduos da primeira geração interagem entre si para formar os descendentes, estes descendentes irão compor a segunda geração e, portanto, a segunda população melhor adaptada. Como o número de gerações é comumente estabelecido como um critério de parada para o algoritmo, então este processo se repetirá até que o número máximo de gerações, pré-estabelecido, seja alcançado.

4.2 OPERAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO

O AG inicia basicamente com um conjunto de indivíduos gerados aleatoriamente, de forma codificada, estes indivíduos representam um conjunto de soluções para um

determinado problema, estas soluções compõem a população inicial. Tais soluções são decodificadas e avaliadas de acordo com a sua aptidão perante determinado problema. As soluções mais aptas são selecionadas para compor um novo conjunto de soluções, formando uma nova geração de soluções (indivíduos) e, portanto, uma nova população. As novas soluções são então modificadas através de mutação para serem reavaliadas a cada geração repetindo o ciclo até que um critério de parada seja atendido, no caso do AG este critério é que o número máximo de gerações seja alcançado. A seleção dos indivíduos melhor adaptados, a decodificação dos mesmos para valores reais e a mutação sofrida ao longo das gerações, constituem os operadores genéticos do AG. Por fim a melhor aptidão ao longo de todas as gerações é alcançada e a melhor solução é aquela obtida da melhor aptidão. A Figura 4.1 ilustra este procedimento.

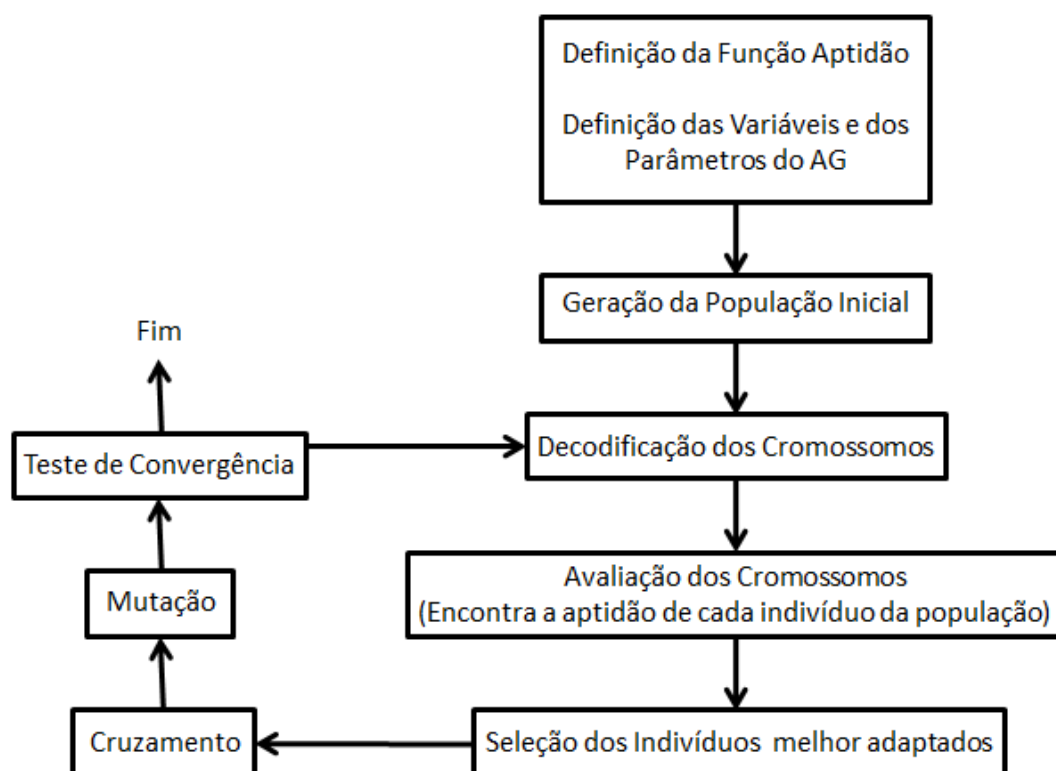


Figura 4.1 – Estrutura em blocos do funcionamento de um AG. Fonte: (HAUPT e HAUPT, 2004), adaptado pelo Autor.

4.2.1 CODIFICAÇÃO E DECODIFICAÇÃO

Uma das maneiras mais simples de codificar um indivíduo é representá-lo como um cromossomo de valores binários. A representação binária foi a primeira a ser idealizada e devido a sua simplicidade foi largamente difundida pelos pesquisadores. Os valores reais dos parâmetros de um problema possuem um intervalo de busca e uma precisão, que influenciam diretamente no tamanho do cromossomo binário correspondente ao indivíduo codificado. Por isso, sempre que ocorre a transformação de um número binário para um número real e vice e versa, ocorre um erro de quantização.

Para exemplificar o processo de codificação, é necessário primeiro definir o que seria um indivíduo (cromossomo) de uma população. Pensando no problema de minimização dos custos energéticos considerando as cargas de refrigeração como elementos de aplicação de um GLD, cada cromossomo pode ser entendido como uma curva de carga pré-planejada, onde cada posto horário representa uma variável otimizada, pois cada posto horário é encarado como uma variável independente já que o consumidor final tem a liberdade de definir seu padrão de consumo a cada instante em um dia de operação normal. Assim, um cromossomo pode ser representado como na equação 4.1 (HAUPT e HAUPT, 2004).

$$cromossomo = \{P_{a1}, P_{a2}, P_{a3}, \dots, P_{a_{na}}\} \quad (4.1)$$

Onde P_{ai} representa a variável relativa à amostra atual para cada posto horário da curva de carga e na é o numero de amostras contidas na curva de carga. Assim, a equação (4.1) na verdade representa um cromossomo concatenado onde cada variável é codificada em uma lista de bits agrupados, onde cada bit representa um gene. Para codificar uma variável em vários genes primeiro é necessário normalizar a variável conforme a equação (4.2). Assim, cada gene de um cromossomo será obtido conforme (4.3).

$$p_{norm} = \frac{P_i - p_{lo}}{p_{hi} - p_{lo}} \quad (4.2)$$

$$gene[m] = round \left\{ p_{norm} \cdot 2^m - \sum_{p=1}^{m-1} gene[p] \cdot 2^{-p} \right\} \quad (4.3)$$

Onde p_{norm} é uma variável normalizada, isto é, $0 \leq p_{norm} \leq 1$; p_{lo} é o mínimo valor da variável; p_{hi} é o máximo valor da variável; $gene[m]$ é a versão binária da variável P_i ; $round\{\cdot\}$ é utilizada para arredondar o valor do gene para o inteiro mais próximo, podendo ser 0 ou 1; m é a posição do gene no cromossomo e varia de 1 até o numero de bits ($N_{gene} = N_{bits}$).

Já para decodificar um conjunto de genes de uma variável, o processo inverso é realizado, conforme as equações (4.4) e (4.5).

$$p_{quant} = \sum_{m=1}^{N_{gene}} gene[m] \cdot 2^{-m} + 2^{-(M+1)} \quad (4.4)$$

$$q_n = p_{quant} (p_{hi} - p_{lo}) + p_{lo} \quad (4.5)$$

Onde p_{quant} é a versão quantizada de p_{norm} e q_n é a versão quantizada de P_i . A quantidade de bits é encontrada conforme a equação (4.6).

$$N_{gene} = \log_2(p_{hi}) \quad (4.6)$$

4.2.2 POPULAÇÃO INICIAL

A população inicial é o conjunto de indivíduos presentes na primeira geração. Cujos valores são atribuídos aleatoriamente em espaços de busca restritos. É comum fixar o tamanho da população (N_{pop}), isto é, manter constante o número de indivíduos ao longo das gerações. Estas estratégias são mais simples e geram bons resultados, pois a geração pseudoaleatória, isto é, considerando as restrições da população, garante uma boa distribuição das soluções. Dependendo do problema, a população inicial pode ser definida com dados que melhore a busca dos valores ótimos. O tamanho da população também depende do problema de otimização, pois uma população com muitos indivíduos aumenta o espaço de busca, no entanto, uma superpopulação pode gerar problemas de desempenho computacional, pois a cada geração será também ampliado o número de recorrência à função de aptidão (LINDEN, 2012). A equação (4.7) mostra como foi criada a população inicial para o problema abordado nesta dissertação.

$$população = round(rand(N_{pop}, N_{var} \cdot N_{bits})) \quad (4.7)$$

Onde a função $rand(.)$ cria uma matriz de números aleatórios entre 0 e 1 com N_{pop} linhas, onde N_{pop} é o número de indivíduos da população e o número de colunas é igual ao produto entre o número de variáveis (N_{var}) e o número de bits (N_{bits}). Já a função $round(.)$ garante que a população seja totalmente binária, pois arredonda cada número aleatório para o inteiro mais próximo, isto é, 0 ou 1.

4.2.3 AVALIAÇÃO

Na etapa de avaliação se dá atribuição dos indivíduos da população na função de aptidão. Para isso é necessário decodificar os indivíduos para a forma real conforme as equações (4.4) e (4.5) para assim avaliar cada indivíduo. Cada indivíduo receberá uma medida se sua adaptabilidade no problema de minimização dos custos energéticos, chamada custo. A etapa de avaliação é encerrada após cada indivíduo, de uma determinada geração, obter um valor de custo. Os indivíduos com melhores custos (ou maiores aptidões) são mais propensos a gerar descendentes que irão compor a geração seguinte. Porém, somente na etapa de seleção que os indivíduos são escolhidos para transmitir as suas informações cromossômicas para as próximas gerações.

Caso os indivíduos apresentem soluções inadequadas. É atribuído uma restrição para a solução inadequada. Dentre as diversas formas de restrição optou-se por utilizar uma função de penalidade, isto é, uma técnica que consiste na aplicação de penalidades para as soluções que violam as restrições. Como se trata de um problema de minimização o indivíduo sofre um aumento no *custo*, ficando mais longe da solução ótima. Esta abordagem é simples de ser implementada e possui baixo custo

computacional, no entanto, não é garantido de modo determinístico que as soluções que violam as restrições serão eliminadas ao longo das gerações.

4.2.4 SELEÇÃO VIA ROLETA

Na etapa de seleção, que ocorre após a avaliação dos indivíduos da população, o AG seleciona os indivíduos que vão reproduzir para gerar os descendentes da geração seguinte. De acordo com a teoria da evolução, os indivíduos mais adaptados têm maior probabilidade de transmitir seus genes e assim contribuir para que as melhores atribuições sejam passadas para as próximas gerações. Apesar disso, também é necessário que ocorra variabilidade genética, pois assim, as melhores características, mesmo em indivíduos menos adaptados, podem ser transmitidas (HAUPT e HAUPT, 2004). Assim, o AG não pode descartar completamente os indivíduos menos adaptados, pois eles podem possuir características para a geração do melhor indivíduo.

Um dos métodos de seleção mais comuns é o método da roleta, também conhecido como pareamento aleatório ponderado. Este método se adapta bem ao problema de gerenciamento da energia pelo lado da demanda, como mostrado por Siebert, *et al.* (2012) e Vidal & Batista (2014).

Como é sabida, a probabilidade de um indivíduo da população ser selecionado para o cruzamento é inversamente proporcional ao seu custo, para os problemas de minimização, isto é, um indivíduo com baixo custo tem uma grande probabilidade de acasalar, enquanto que um indivíduo com alto custo tem uma pequena probabilidade de acasalar. Um número aleatório determina que indivíduo será selecionado.

Como é mostrado em Haupt & Haupt (2004), uma das formas mais rápidas e eficazes de se ponderar as probabilidades em uma roleta é por meio do ponderamento pela aptidão. A probabilidade de selecionar um indivíduo é calculada através do custo normalizado da função objetivo de cada indivíduo. A normalização se dá pela subtração entre o custo de cada indivíduo (c_n) e o menor custo da parcela da população que não foi selecionada (c_{N_k+1}). A parcela da população selecionada para o cruzamento é representada por N_k e o custo normalizado por indivíduo é representado pela equação (4.8).

$$C_n = c_n - c_{N_k+1} \quad (4.8)$$

A equação (4.8) garante que todos os custos serão negativos. A probabilidade associada a cada indivíduo da população é então calculada conforme a equação (4.9).

$$P_n = \frac{C_n}{\sum_{m=1}^{N_k} C_m} \quad (4.9)$$

Esta aproximação dada pela equação (4.9) tende a atribuir ao indivíduo com menor custo normalizado, a maior probabilidade de seleção, sem descartar os demais indivíduos, já que se trata de uma escolha pseudoaleatória e não puramente determinística. Além disso, também é possível ponderar a melhor escolha de forma mais evidente em casos onde os custos associados a cada indivíduo são muito aproximados. A probabilidade deve ser recalculada a cada geração devido à reavaliação.

4.2.5 CRUZAMENTO (CROSSOVER)

Tendo realizado a seleção dos indivíduos, os mesmos serão pareados e atribuí-se a tag *pai* ou *mãe* aos indivíduos do par. Um cruzamento nada mais é do que a combinação dos genes pertencentes aos cromossomos do *pai* e da *mãe* a fim de gerar dois filhos para a nova geração. O cruzamento entre os indivíduos selecionados deve ocorrer até que a quantidade de filhos gerados alcance o tamanho da população (N_{pop}).

A probabilidade de ocorrência de um cruzamento é pré-definida e é chamada de taxa de cruzamento. Quando ocorre cruzamento, os pais transmitem parte de seus genes para os filhos, porém, quando não ocorre, os filhos se tornam cópias dos pais. O cruzamento em um ponto, em cromossomos binários é forma mais simples de se realizar um cruzamento, sua representação é mostrada na Figura 4.2.

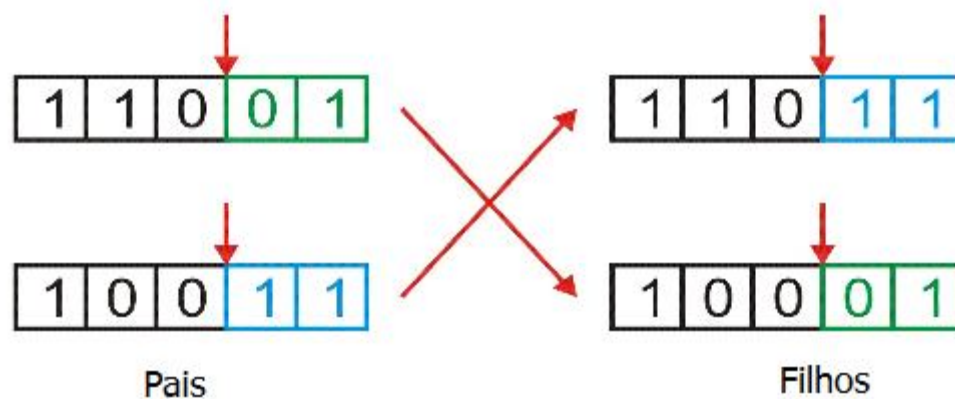


Figura 4.2 – Cruzamento simples de um ponto. Fonte: (VILLANUEVA, 2016).

No cruzamento de um ponto é escolhido um ponto de corte em uma posição aleatória que divide o cromossomo dos pais em duas partes. Cada filho é formado por uma parte de cada pai (VILLANUEVA, 2016). O ponto de corte é responsável por realizar o cruzamento das informações contidas nos genes. Quando existem vários pontos de cortes, o cruzamento dos genes entre os cromossomos é feito em cada ponto de corte, como é explicado detalhadamente em Haupt & Haupt (2004).

4.2.6 MUTAÇÃO

Chegando à etapa de mutação, a população já possui os novos indivíduos oriundos da etapa de cruzamento. Cada bit dos novos cromossomos (indivíduos) possui uma probabilidade pré-definida de sofrer mutação. Esta probabilidade é chamada de taxa de mutação (μ). O número de mutações ocorridas na população (N_{mut}) é determinado

conforme a equação (4.10); já a localização dos bits que sofrerão mutação pode ser encontrada conforme as equações (4.11) e (4.12).

$$N_{mut} = \mu \cdot (N_{pop} - 1) \cdot N_{bits} \quad (4.10)$$

$$N_{linha} = \left(rand(1, \mu) \cdot (N_{pop} - 1) \right) + 1 \quad (4.11)$$

$$N_{coluna} = rand(1, \mu) \cdot N_{bits} \quad (4.12)$$

Onde N_{linha} é um vetor contendo os índices de todas as linhas da matriz *população* onde haverá mutação; N_{coluna} é um vetor contendo os índices de todas as colunas da matriz *população* onde haverá mutação. Vale ressaltar que sempre que os coeficientes dos vetores não apresentarem valores inteiros, devem ser aproximados ao inteiro superior mais próximo.

A mutação é um operador que contribui para a diversidade genética na população, pois a alteração nos genes pode gerar soluções ainda não exploradas pelo AG em um determinado problema. Por outro lado, μ não pode ser alta, pois geraria um alto grau de aleatoriedade na busca da melhor solução. A Figura 4.3 mostra um cromossomo binário antes e depois da mutação. Cada gene teve 1% de chance de sofrer mutação, mas apenas o terceiro gene aleatoriamente acertou a probabilidade.



Figura 4.3 – Operador de Mutação. Fonte: (VILLANUEVA, 2016).

No capítulo a seguir será apresentada a metodologia adotada no trabalho bem como as características do sistema teste.

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIA

Com a evolução das redes elétricas, a necessidade de sistemas elétricos mais eficientes se tornou uma grande prioridade, já que apesar do crescente aumento do consumo de energia, a capacidade de geração via grandes geradores instalados em pontos distantes dos centros de consumo está cada vez mais comprometida. Por este motivo, o gerenciamento da energia pelo lado do consumidor pode ser uma das grandes maneiras de melhorar a utilização do recurso energético, mediante a existência de uma nova infraestrutura da rede que possibilite comunicação entre os diversos ramos e incorporação de sistemas de informação a fim de viabilizar elementos de automação. Muitas vezes, para que determinada estratégia de resposta à demanda funcione, é necessária à incorporação de elementos que aumentem a independência das unidades consumidoras em relação à rede principal, como elementos armazenadores de energia ou mesmo fontes de energia renováveis acoplados a rede de distribuição em baixa tensão.

Neste sentido, este capítulo apresenta a metodologia proposta para gerenciamento da demanda utilizando um sistema de armazenamento térmico juntamente com um gerador fotovoltaico. São apresentadas as ferramentas utilizadas, bem como o encadeamento das atividades desenvolvidas desde a concepção do problema até a criação dos cenários.

5.1 CARACTERÍSTICAS DA UNIDADE CONSUMIDORA

O sistema teste foi apresentado por (SILVA, 2013), em que a autora utilizou a rede de distribuição do Campus Universitário do Guamá, onde estão situadas as instalações da Universidade Federal do Pará (UFPA). A Figura 5.1 apresenta um mapa simplificado com todas as edificações presentes no campus universitário.

A UFPA passou a ter um olhar diferenciado para o gerenciamento de consumo de energia a partir do ano 2000, devido, principalmente, à aceleração da sua expansão no interior do Estado do Pará e à modernização dos seus laboratórios de pesquisa. Isto representou um aumento significativo do custo, principalmente, com relação às tarifas públicas: água, energia elétrica, telefonia e transmissão de dados (DE MATOS, 2016).

Com os problemas atuais de falta de oferta de energia elétrica, alto valor da tarifa e os cortes nas verbas de manutenção das universidades públicas, torna-se necessária uma gestão mais eficiente das instalações elétricas da UFPA, com o principal objetivo de diagnosticar e propor soluções para mitigar as possíveis perdas. Assim, detectou-se a necessidade de um sistema de monitoramento informatizado, para medição e gerenciamento das grandezas elétricas e financeiras.

Atualmente está em operação um sistema para o tratamento da energia elétrica, considerando-a não como um problema isolado, mas sim, integrado, envolvendo não só os aspectos específicos das instalações e equipamentos consumidores, mas também a implantação de um sistema de gestão energética, através da instalação de uma rede de aquisição, transmissão e processamento de dados, com o objetivo de supervisionar e analisar a qualidade de energia elétrica (DE MATOS, 2016). Tal sistema, chamado de

projeto SISGEE (Sistema de Gestão de Energia Elétrica), é capaz de monitorar o consumo de energia elétrica das instalações consumidoras gerando relatórios e demais subsídios para a gestão estratégica e efetiva do sistema de energia, com indicadores que refletem o grau de eficiência, economia e qualidade do sistema, além de garantir uma maior segurança, evitando a ocorrência de incidentes e sinistros nas instalações consumidoras (DE MATOS, 2016).



Figura 5.1 - Mapa do campus universitário do Guamá. Fonte: UFPA, 2011

A UFPA possui 40 unidades consumidoras (UC) de energia elétrica, distribuídas no município de Belém e demais localidades no interior do Estado do Pará. O Campus Prof. José de Silveira Neto, conhecido como “Campus Universitário do Guamá”, localizado na cidade de Belém/PA, às margens do rio Guamá, é identificado pela concessionária de distribuição de energia elétrica local como UC 19.

Considerada como a principal UC de energia elétrica da Universidade Federal do Pará, a UC-19 engloba 84 (oitenta e quatro) unidades acadêmicas e/ou administrativas ao longo do Campus Universitário do Guamá e tem o seu fornecimento de energia elétrica em 13,8 kV, através do alimentador Guamá (GM-06), proveniente da Subestação Guamá da concessionária de energia local. Todos os seus prédios são atendidos pelos circuitos oriundos da cabine de medição geral, localizada no Campus Básico, onde é instalada a proteção primária geral (DE MATOS, 2016).

A partir desse ponto de entrega de energia e medição, o atendimento interno é feito em rede de distribuição primária através de quatro alimentadores, sendo dois para o setor básico, um para o setor profissional e um para o setor de saúde.

O consumo de energia da universidade é influenciado por diversos fatores, como o período de atividades regulares e período de férias. Uma curva de consumo diária de toda a universidade foi obtida por meio do projeto SISGEE e pode ser observada na Figura 5.2.

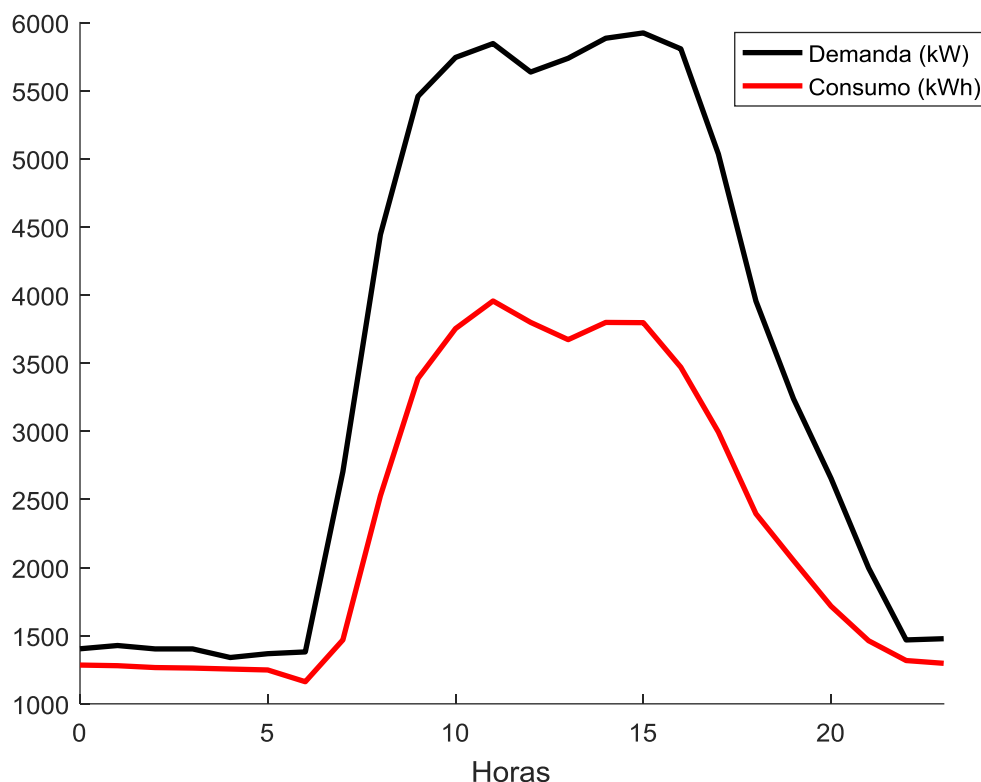


Figura 5.2 – Curva de consumo e demanda de um dia típico. Fonte: (SILVA, 2013), modificada pelo Autor.

Maiores detalhes sobre a demanda e o consumo da universidade podem ser observados na Tabela 5-1. O maior valor de demanda de todas as medições realizadas durante os meses foi 5.924 kW. De acordo com as medidas, o consumo está acima de 18.648.372 kWh/ano, 1.613.774,83 kWh/mês e 53.792,50 kWh/dia em média.

Além das medidas realizadas no ponto de conexão com a rede, alguns outros pontos de medição dentro da UFPA foram considerados como parte do projeto SISGEE para estimar o consumo das 84 unidades acadêmicas e/ou administrativas e estabelecer os dados de carga do sistema teste (SILVA, 2013). Esses pontos de medição internos corresponderam a 21 unidades consumidoras listadas na Tabela 5-2.

Tabela 5-1: Levantamento da demanda e do consumo médio diário. Fonte: (SILVA, 2013)

Hora	Demanda (kW)	Consumo (kWh)
00:00:00	1404	1284,53
01:00:00	1428	1279,86
02:00:00	1403	1266,19
03:00:00	1403	1262,48
04:00:00	1340	1255,37
05:00:00	1368	1248,48
06:00:00	1381	1162,21
07:00:00	2704	1469,29
08:00:00	4444	2526,94
09:00:00	5459	3387,83
10:00:00	5744	3753,98
11:00:00	5846	3956,60
12:00:00	5637	3799,57
13:00:00	5738	3672,85
14:00:00	5885	3799,18
15:00:00	5924	3797,42
16:00:00	5807	3470,44
17:00:00	5035	2994,55
18:00:00	3956	2395,03
19:00:00	3239	2052,28
20:00:00	2655	1716,95
21:00:00	1997	1463,21
22:00:00	1469	1317,70
23:00:00	1478	1297,38

Tabela 5-2: Lista de unidades consumidoras monitoradas. Fonte: (SILVA, 2013)

Barra de Referencia	Local de Referencia	Barra de Referencia	Local de Referencia
9	Geociências	50	Socioeconômico
12	Reitoria 1	51	NAEA
13	Biblioteca Central	54	Farmácia
21	Vadião	59	CEAMAZON
22	CTIC	61	Letras e comunicação
23	Auditório	62	Capacit / NCADR1
42	Sala de aula I	69	Betina
47	ITEC	70	Capacit / NCADR2
48	ICED	73	Biblioteca Central 2 e 3
49	Salas de aula II	74	Reitoria 2

5.2 DESCRIÇÃO DA EDIFICAÇÃO

Apesar de o sistema teste possuir mais de 84 unidades acadêmicas, os estudos de gerenciamento de carga foram realizados somente nos blocos de aula do setor profissional. A subestação que alimenta os blocos de aula fica situada no bloco D e atende a área dos blocos A, B, C, D, E e F, bem como seus respectivos corredores e banheiros. Nos blocos em questão, apresentados na Figura 5.3, estão localizadas as salas de aula dos cursos de engenharia e pedagogia, assim como seus centros acadêmicos e alguns laboratórios de informática.

A subestação é abrigada e com cabeamento subterrâneo interligando a descida dos condutores em alta tensão do poste até o ramal de entrada onde há a interligação com o transformador (BEZERRA e TOSTES, 2012). Os dados do transformador da subestação são apresentados na Tabela 5-3.

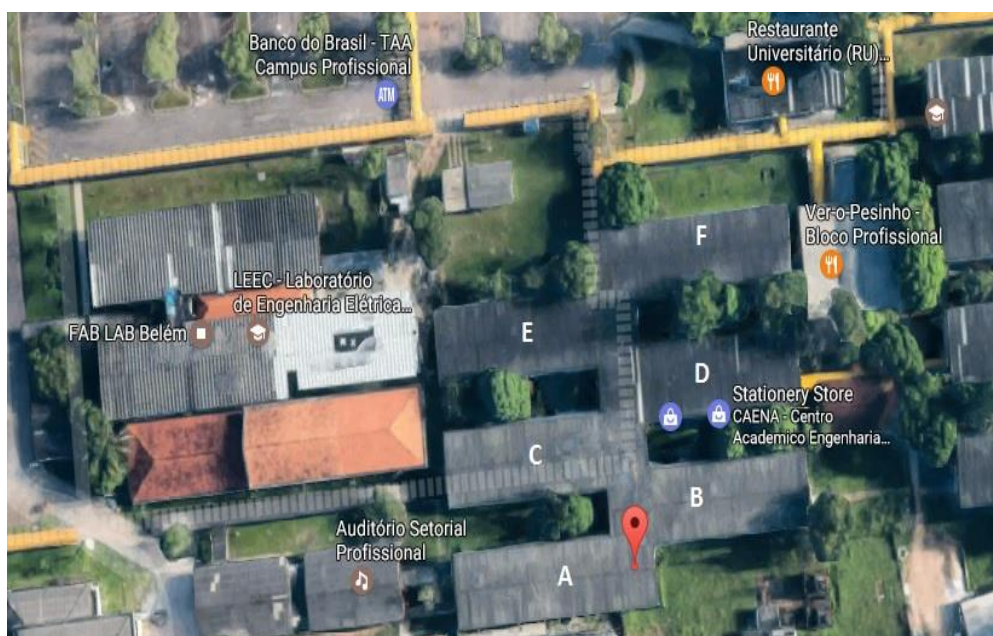


Figura 5.3 – Alguns pavilhões de aula do setor profissional. Fonte: Google Maps. 2018, modificada pelo Autor

Tabela 5-3: Características do transformador instalado no pavilhão. Fonte: (BEZERRA e TOSTES, 2012).

Potência	Tensão	Ligação
300 kVA	13,8 kV – 220V/127V	Δ/Y (Aterrado)

A edificação é composta por seis blocos por andar, cada bloco mede 423,15 m² de área, sendo o comprimento de 39 metros, largura de 10,85 metros e altura de 3,10 metros, incluindo a largura da sala e do corredor, totalizando 2.538,90 m² de área para cada andar. Considerando-se o primeiro e o segundo andar desses blocos, tem-se:

- 60 salas de aula com 50,40 m² e capacidade para 40 pessoas;
- 6 centros acadêmicos com 25,20 m² (Bloco D) e capacidade para 10 pessoas;

- 1 centro acadêmico com 50,40 m² (Bloco E) e capacidade para 20 pessoas;
- 2 salas de professores com 50,40 m² e capacidade para 20 pessoas;
- 2 salas de desenho, sendo uma de 75,60 m² e capacidade para 60 pessoas; e outra de 50,40 m² e capacidade para 40 pessoas;
- 1 livraria medindo 12 m² e capacidade para 5 pessoas;
- sala de informática de 50,40 m² e capacidade para 20 pessoas;
- 12 corredores (um para cada andar do bloco) medindo 39 m de comprimento por 2,85 m de largura.
- 12 corredores de interligação dos blocos medindo 65,10 m de comprimento e 6,55 m de largura.

5.3 COLETA DE DADOS

A coleta de dados de consumo dos blocos de aula foi realizada inicialmente em 2012 e apresentada em relatório pela equipe técnica do Centro de Excelência em Eficiência Energética da Amazônia (CEAMAZON) (BEZERRA e TOSTES, 2012). Porém, em 2018, o autor do presente trabalho realizou uma nova vistoria e constatou uma modificação na potência instalada das cargas de refrigeração. Assim, os dados apresentados em (BEZERRA e TOSTES, 2012) foram atualizados.

A carga da referida unidade consumidora foi dividida em três classes, conforme (BEZERRA e TOSTES, 2012): **iluminação**, que engloba toda a iluminação artificial da unidade; **climatização**, que considera os climatizadores de ar tipo janela e Split; **outros equipamentos**, que considera impressoras, geladeiras, cafeteiras, micro-ondas, bebedouros, televisores e equipamentos de laboratórios. A Tabela 5-4 mostra a potência instalada por classe nos blocos, bem como o percentual relativo a cada classe em relação à potência instalada total dos blocos. Fica evidente a participação majoritária das cargas de refrigeração.

Tabela 5-4: Potência instalada nos blocos. Fonte: (BEZERRA e TOSTES, 2012) modificado pelo autor.

Classe	Potência Instalada (W)	Parcela da Carga (%)
Iluminação	54.374	17,62
Climatização	237.585	77,00
Outros equipamentos	16.600	5,38
Total	308.559	100

Tomando como base as dimensões das salas dos blocos, que é de aproximadamente 50 m², com um número de ocupantes médio igual a 35 alunos, considerando as salas expostas ao sol e a troca de calor entre o primeiro e segundo piso com cobertura de concreto (laje), a potência de resfriamento mínima a ser utilizada deve ser entorno de 44.000BTU/h em cada uma das salas (BEZERRA e TOSTES, 2012). Para mensurar essa grandeza em relação ao que se tem hoje nas salas de aula, fez-se nesta dissertação o levantamento da quantidade de equipamentos de refrigeração presentes nos blocos. A Tabela 5-5 mostra o resultado do levantamento.

Tabela 5-5: Relação dos condicionadores de ar nos ambientes. Fonte: Autor.

Fabricante	Potência (BTU/h)	Tipo	Quantidade
ELGIN	24.000	SPLIT	16
	30.000	SPLIT	7
MIDEA	18.000	SPLIT	10
	24.000	SPLIT	4
	30.000	SPLIT	13
ELETROLUX	24.000	SPLIT	18
LG	23.000	SPLIT	16
HITACHI	30.000	SPLIT	1
SPRINGER	22.000	SPLIT	2
	21.000	ACJ	8
KOMECO	30.000	SPLIT	6
GREE	24.000	ACJ	11
	13.000	SPLIT	8
CARRIER	18.000	SPLIT	8
	24.000	SPLIT	3
TOTAL			131

Assim, conforme a Tabela 5-5 se pode calcular a média da potência de resfriamento por sala, chegando-se ao valor de 43.670 BTU/h, que é de acordo com o que foi pré-estabelecido.

Com base nos dados de carga, sabe-se que a demanda dos blocos de aula representa cerca de 2% da demanda de toda a cidade universitária no caso de carga pesada. Para se obter o comportamento da carga ao longo do dia, considerou-se então que a porcentagem da demanda dos blocos de aula representa cerca de 2% da demanda de toda a cidade universitária. Além disso, devido à predominância de funcionamento no horário comercial desprezou-se a carga da madrugada, pois há uma grande insignificância em relação à carga média. Assim, a Figura 5.4 ilustra a curva de carregamento dos blocos de sala de aula utilizados neste estudo, e apresentados na Figura 5.3.

Como mostrado na Tabela 5-4, 77% da carga elétrica dos blocos de aula é destinada a cargas de climatização (refrigeração). Assim, a carga térmica dos blocos pode ser estimada conforme a Figura 5.5.

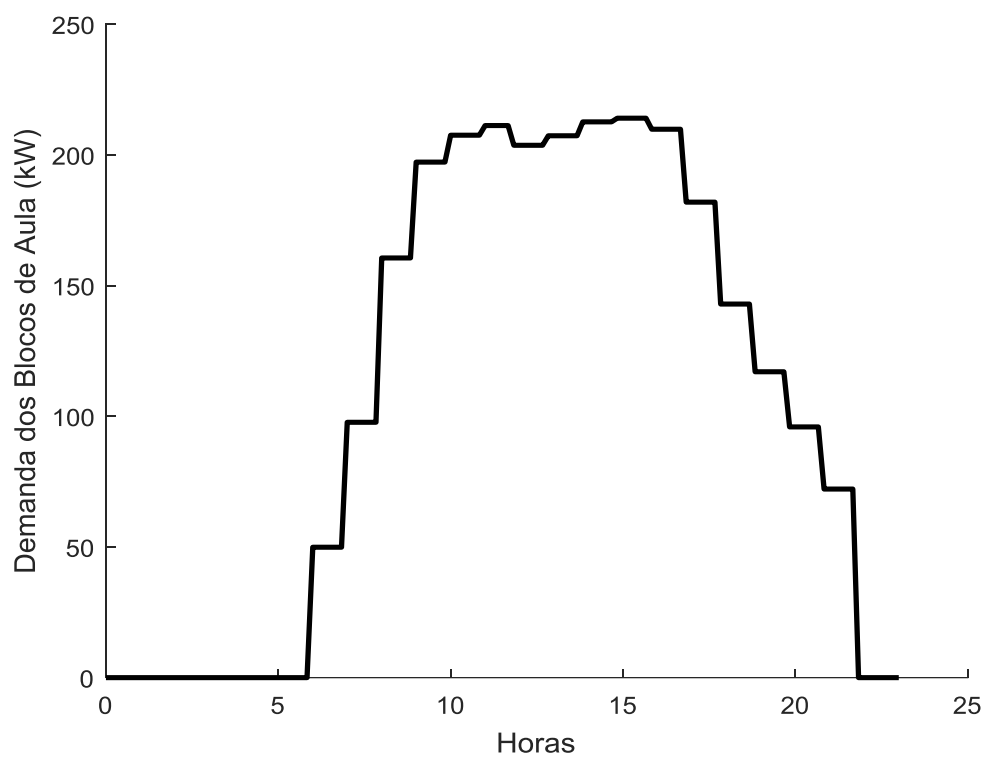


Figura 5.4 – Demanda horária dos blocos de aula. Fonte: Autor.

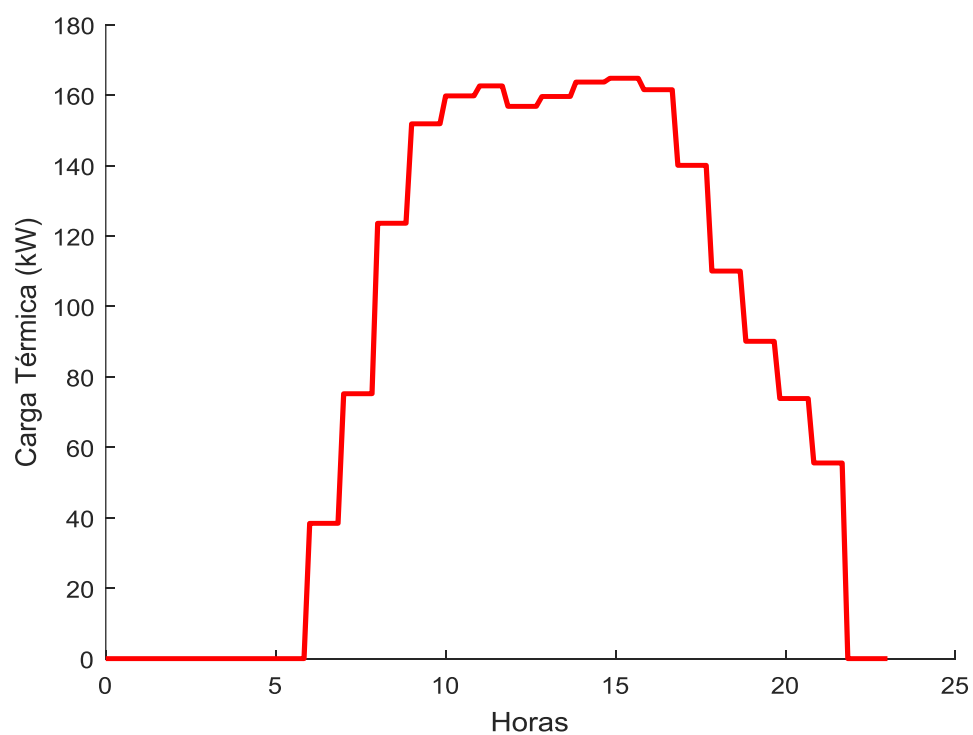


Figura 5.5 – Carga térmica dos blocos de aula. Fonte: Autor.

5.4 MONTAGEM DO DIAGRAMA UNIFILAR

Com os dados extraídos de (SILVA, 2013), montou-se o digrama unifilar mostrado na Figura 5.6. A rede modelada tem uma demanda total de 6,1 MW e 2,33 MVar e a quantidade de perdas obtidas no fluxo de carga foi de 0,048 MW. A potencia contratada do campus universitário é 5,9 MW que em alguns meses é excedido. Para avaliar a necessidade de aumentar a demanda contratada é necessária uma análise de longo prazo.

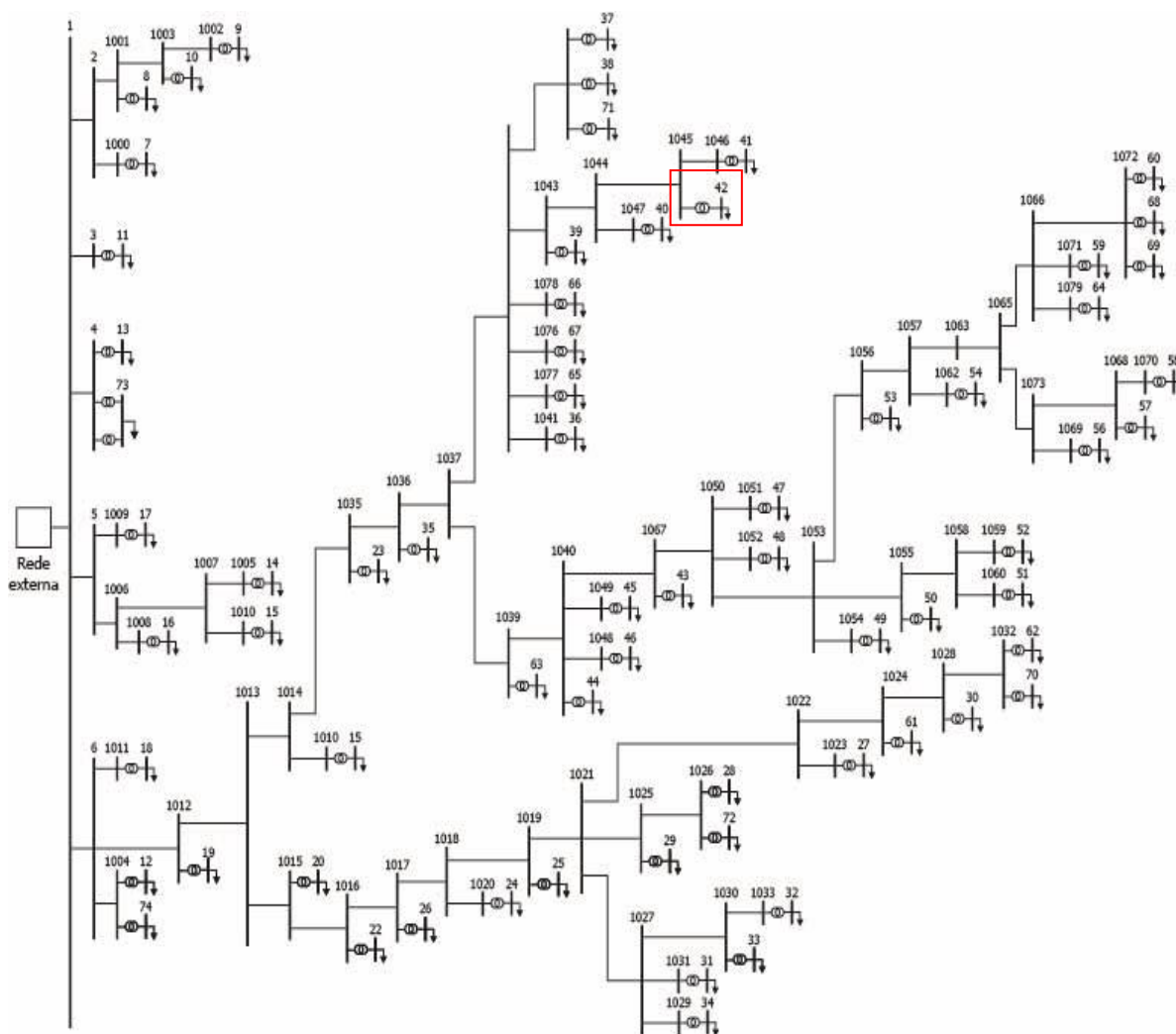


Figura 5.6 – Sistema de distribuição do campus universitário do Guamá. Fonte: Autor.

Na presente dissertação, os testes foram realizados na barra 42 que representa o consumo dos seis blocos de aula do campus profissional, como esta sinalizado em vermelho na Figura 5.6. A barra 42 (secundário do transformador) está conectada a barra 1045 (primário do transformador). Assim, o consumo relativo aos blocos de aula que será considerado durante os estudos de GLD e os deslocamentos de carga será realizado através do controle sobre as cargas de refrigeração. Maiores detalhes das cargas dos blocos de aula foram apresentados nas Tabelas 5-4 e 5-5.

A Figura 5.7 mostra a modelagem da carga dos blocos de aula do campus profissional, para aplicação do gerenciamento energético, de maneira mais aproximada de um possível cenário real, e é uma expansão do modelo apresentado na Figura 5.6. As setas nas barras de carga representam o consumo das unidades que não são destinados ao sistema de refrigeração como iluminação das salas, tomadas, computadores e alguns eletrodomésticos. A carga associada ao sistema de refrigeração é representada por CAC. Além disso, cada bloco de aula foi contemplado com um gerador fotovoltaico apenas em ambiente computacional a fim de avaliar os impactos que este tipo de sistema pode acrescentar nas análises de carga para aplicação do GLD. Detalhes do sistema fotovoltaicos serão apresentados posteriormente.

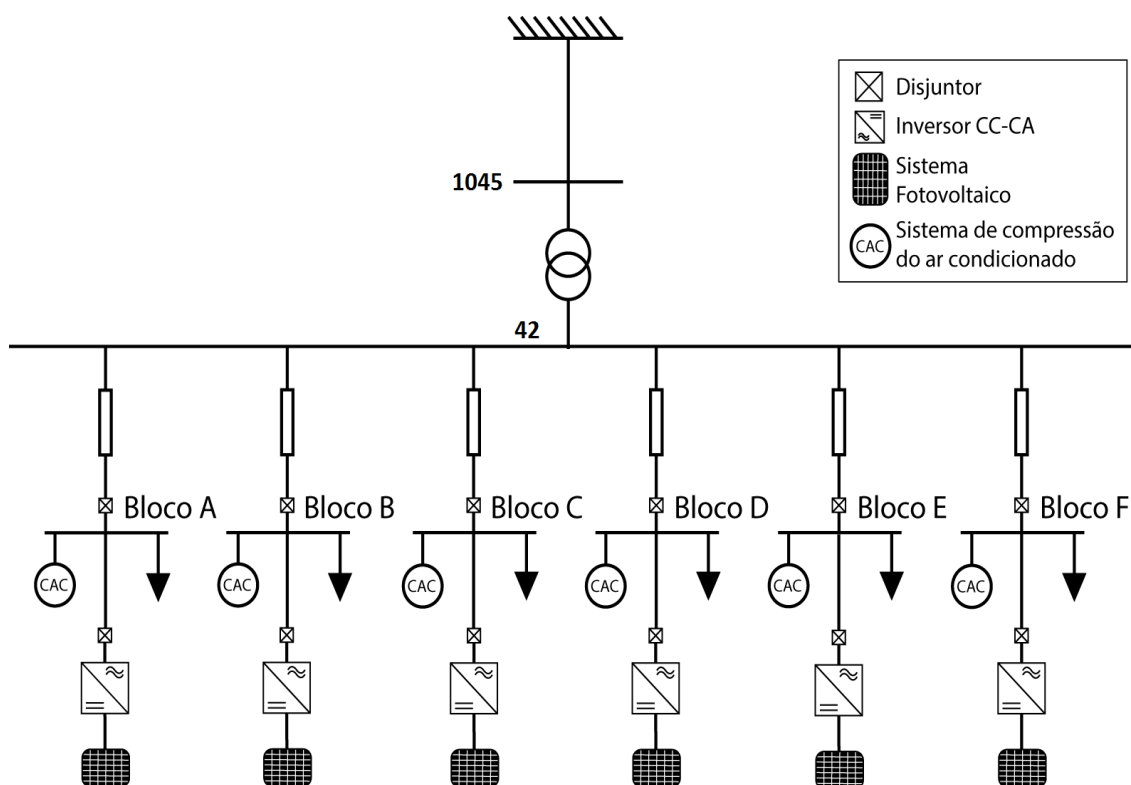


Figura 5.7 – Diagrama unifilar dos blocos de aula. Fonte: Autor.

5.5 TARIFA DE ENERGIA

Desde o ano de 2000, a UFPA monitora as contas de fornecimento de energia elétrica a fim de rastrear o histórico de aumento do consumo e da demanda, permitindo assim a atualização dos contratos de fornecimento de energia elétrica com a concessionária local.

Inicialmente o contrato de fornecimento de energia era definido de acordo com a Tarifa Horo-Sazonal Azul, com demanda contratada na ponta de 2.300 kW e fora de ponta 3.200 kW. Após análise das contas a UFPA solicitou a alteração do contrato para a Tarifa Horo-Sazonal Azul com demanda de ponta de 2.300 kW e 3.750 kW fora de ponta, o que provocou uma considerável redução no valor do contrato de fornecimento.

O contrato atual de fornecimento de energia estabelece a opção da instituição pela Tarifa Horo-Sazonal Verde com demanda contratada de 5.900 kW (a Tarifa Horo-Sazonal Verde não faz distinção de demanda nos horários de ponta ou fora de ponta), o perfil tarifário pode ser observado na Figura 5.8.

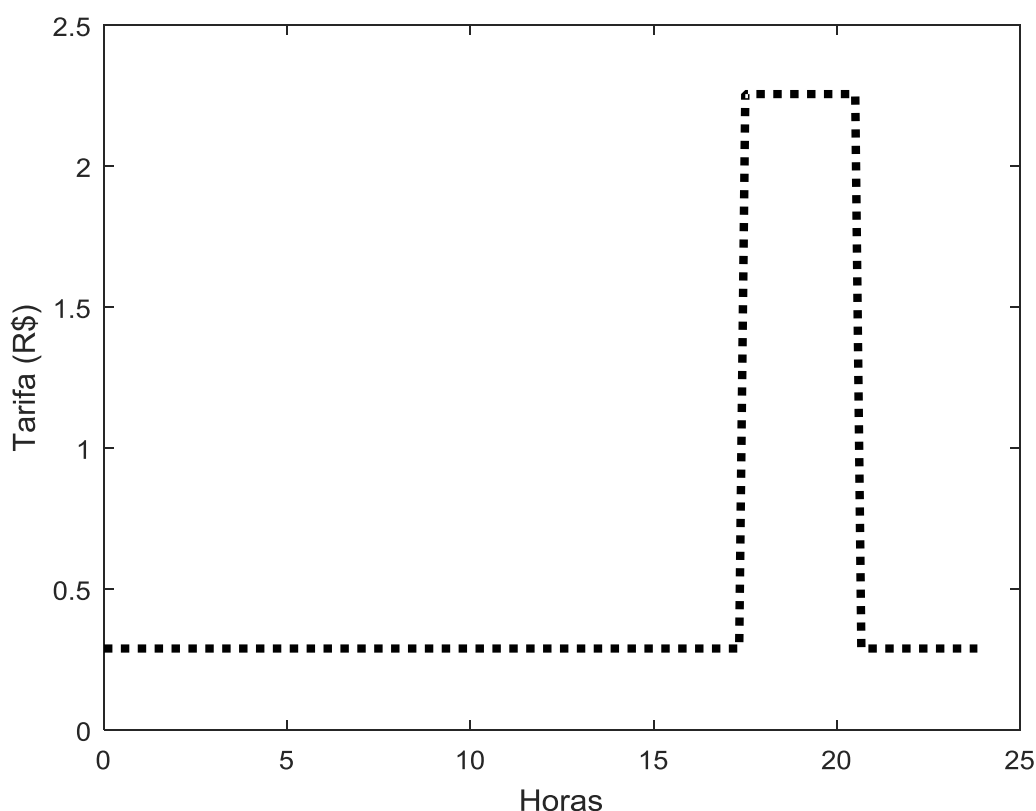


Figura 5.8 – Perfil Tarifário da Tarifa Horo-Sazonal Verde. Fonte: Autor.

Sobre o valor contratado é admitido uma tolerância de +5% para aplicação da tarifa normal, se a tolerância for ultrapassada é cobrada uma multa por excedente de demanda. A Tabela 5-6 apresenta os dados do modelo tarifário utilizado até o momento na UFPA.

Tabela 5-6: Tarifa Horo-Sazonal Verde para o Subgrupo A4 – Poder Público. Fonte: (CELPA, 2018)

Subgrupo	Consumo (R\$/kW)	
A4 - Poder Publico	Ponta (17:30 as 20:30)	Fora de Ponta (00:00 as 17:25) (20:35 as 23:55)
	2,25626	0,28959

5.6 GERAÇÃO SOLAR FOTOVOLTAICA

No que diz respeito à geração fotovoltaica, esta já foi objeto de estudo para implantação em grande escala na cidade universitária, conforme foi mostrado em (SILVA, 2013). Por este motivo, sua utilização na presente dissertação tem por interesse avalia-la como uma estratégia de GLD visando a maximização do benefício econômico com o menor impacto sobre a rede de distribuição, isto é, sobre a rede principal da UFPA.

Para a acomodação dos geradores se considerou os telhados apresentados na Figura 5.3. Projetaram-se os geradores para atender até 70% da demanda média anual das unidades consumidoras. A energia produzida por um gerador fotovoltaico (P_{PV}) pode ser estimada por meio da temperatura do módulo (T_{cel}) e da irradiância ambiente (G_i), conforme a equação (5.1) (PINHO e GALDINO, 2014).

$$P_{PV} = \eta_{inv} N \left(P_{mp,ref} \frac{G_i}{G_{i,ref}} \left(1 + \gamma (T_{cel} - T_{ref}) \right) \right) \quad (5.1)$$

Onde η_{inv} é a eficiência do inversor; N é o número de módulos do gerador; $P_{mp,ref}$ é a potencia pico nominal em (W) de cada módulo nas condições padrão de teste, também conhecidas como STC; a variação da irradiância ambiente com tempo (G_i) é dada em (W/m²); $G_{i,ref}$ é a irradiância na STC em (W/m²); γ é o coeficiente de variação da potência pico com a temperatura dado em (°C⁻¹); T_{ref} é a temperatura na STC em (°C); a temperatura de célula também é dada em (°C) e pode ser determinada conforme a equação (5.2).

$$T_{cel} = T_a + \left(\frac{NOCT - 20}{800} \right) G_i \quad (5.2)$$

Conforme a equação (5.2), a temperatura de módulo pode ser obtida através da temperatura ambiente (T_a) em (°C) a temperatura de trabalho e a irradiância dos

módulos nas condições de operação na temperatura de célula estão representadas por NOCT.

A base de dados utilizada para determinar a irradiância e a temperatura ambiente foi a disponível no programa Meteonorm® que conta com uma vasta base de dados meteorológicos utilizados para projetos de engenharia (METEOTEST, 2016).

A Figura 5.9 mostra a média horária da irradiância em Belém, já a Figura 5.10 mostra a média horária da temperatura ambiente em Belém, ambas de acordo com a base de dados do programa Meteonorm®. A Figura 5.11 mostra a temperatura ambiente média das temperaturas mostradas na Figura 5.10, considerada no estudo. Na Figura 5.12 é mostrada a média das irradiâncias mostradas na Figura 5.9. Por fim, a Figura 5.13 mostra uma estimativa da produção energética dos geradores dispostos no telhado dos blocos de aula calculada conforme a equação (5.1).

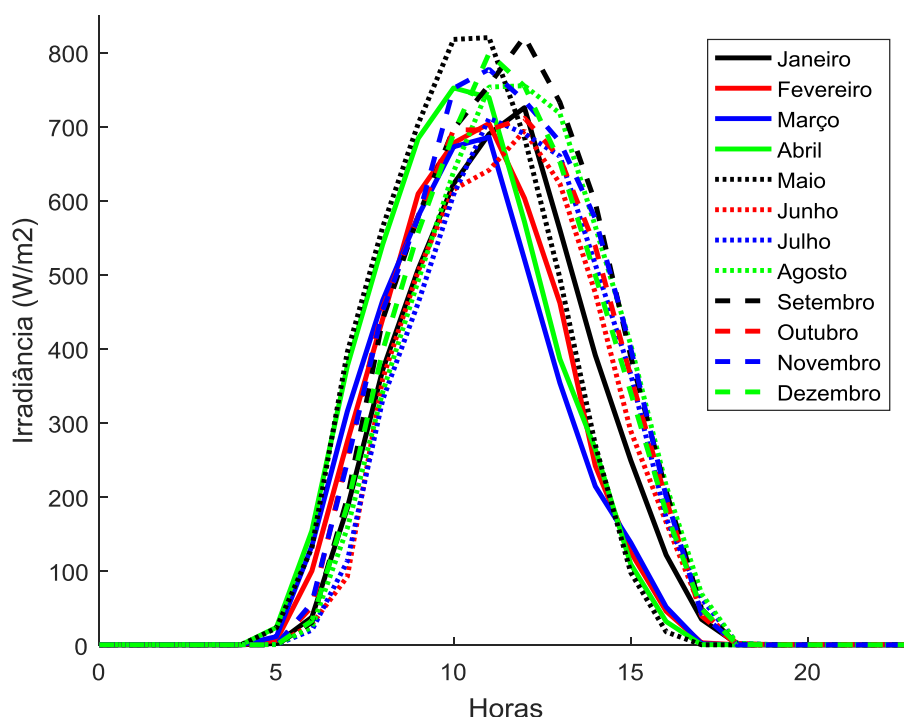


Figura 5.9 – Irradiância média horária para os 12 meses do ano em Belém. Fonte: (METEOTEST, 2016), adaptada pelo autor.

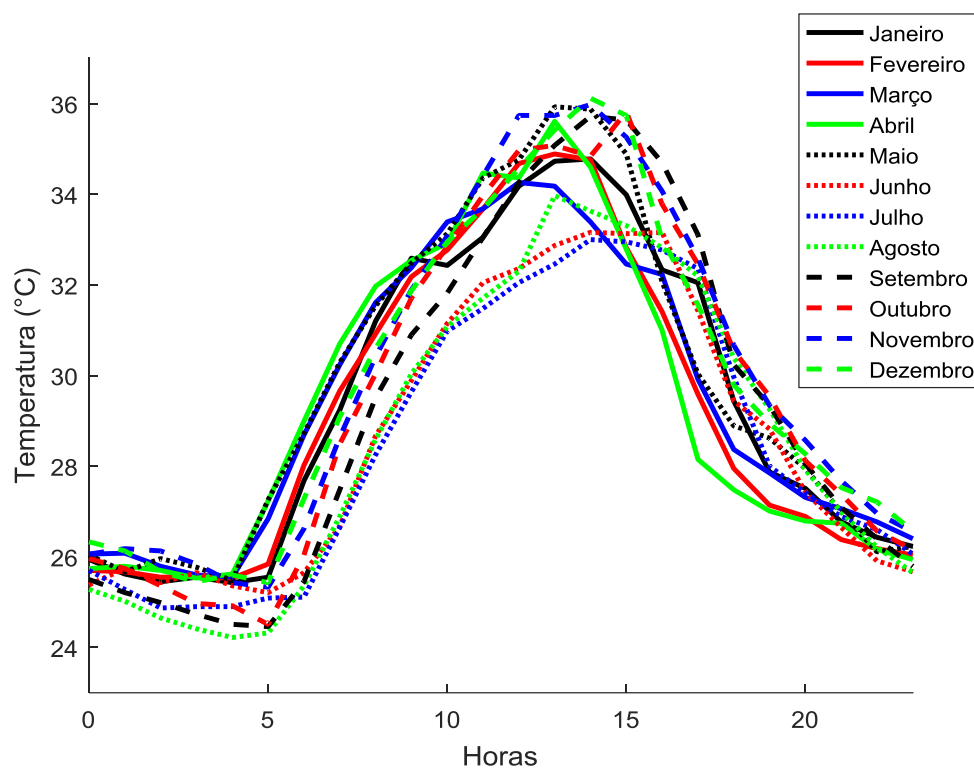


Figura 5.10 – Temperatura ambiente média horária para os 12 meses do ano em Belém. Fonte: (METEOTEST, 2016), adaptada pelo autor.

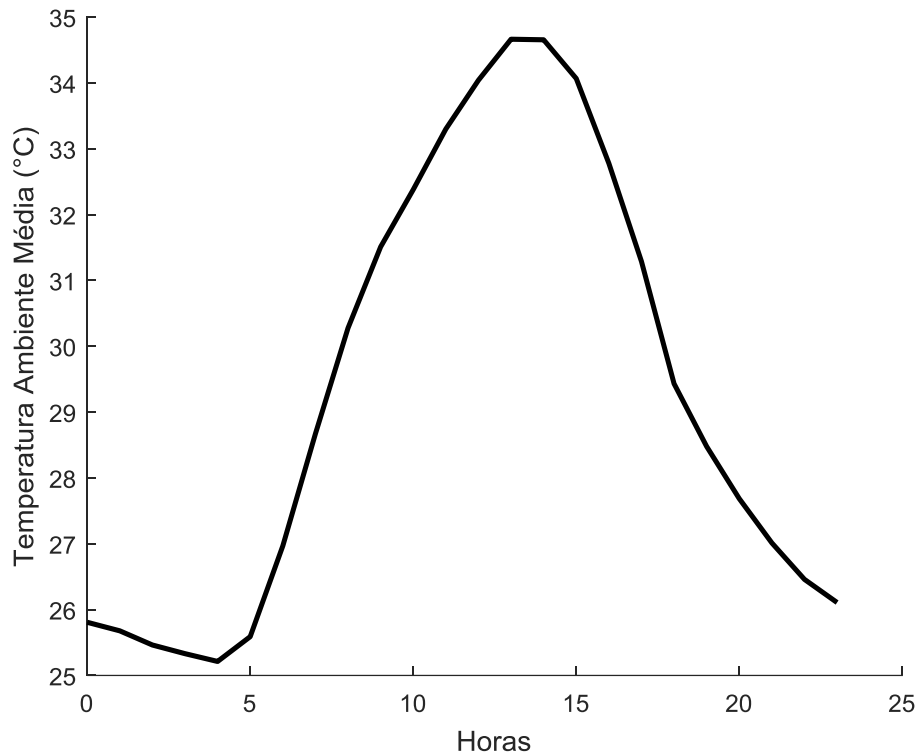


Figura 5.11 – Temperatura ambiente e temperatura dos módulos média anual em 24 horas. Fonte: (METEOTEST, 2016), adaptada pelo autor.

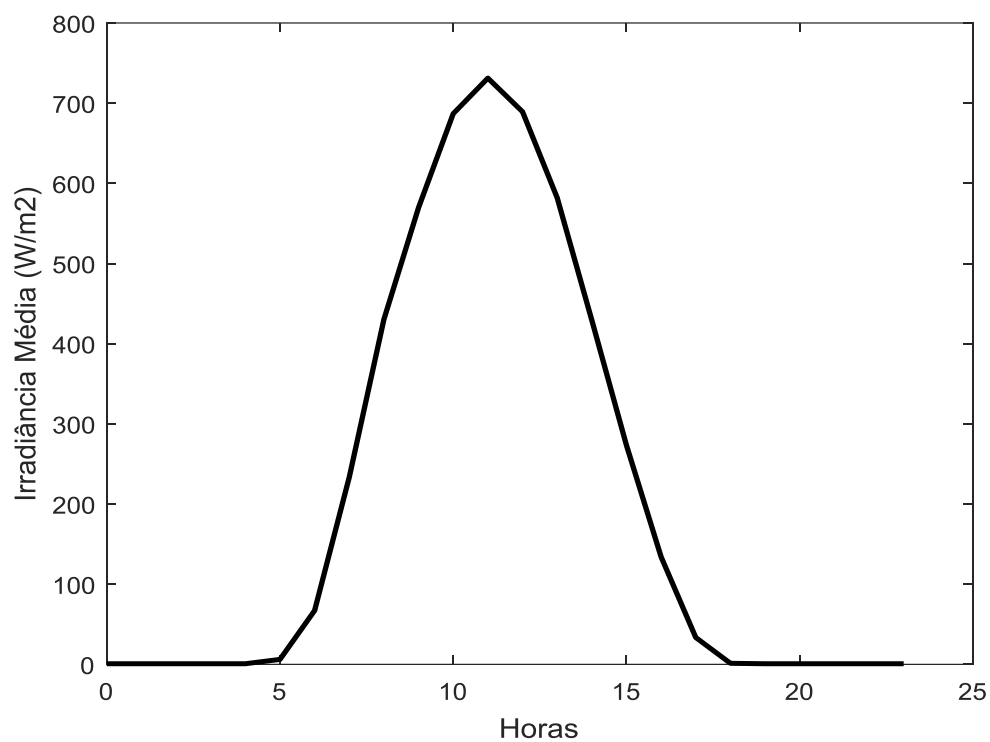


Figura 5.12 – Irradiância média anual em 24 horas. Fonte: (METEOTEST, 2016), adaptada pelo autor.

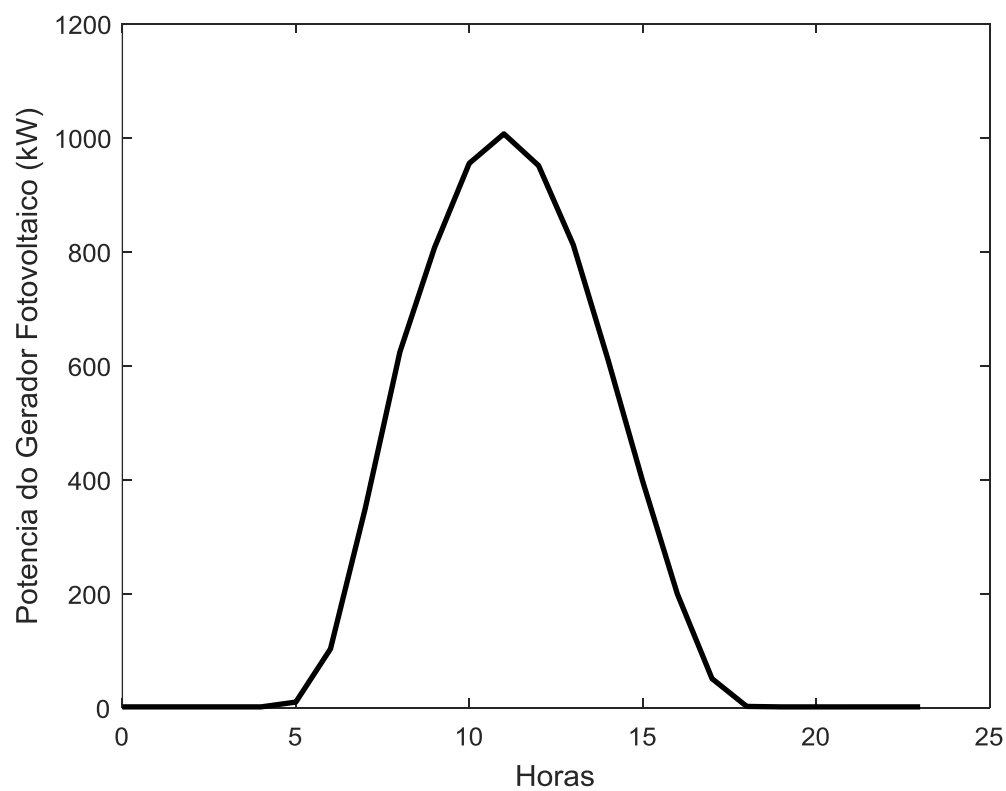


Figura 5.13 – Produção de energia estimada em 24 horas para todos os geradores fotovoltaicos.
Fonte: Autor.

Todos os parâmetros considerados para a estimação da produção energética dos geradores fotovoltaicos foram apresentados na Tabela 5-7. Sabe-se que os seis telhados possuem uma área de 2.934 m² desconsiderando a área dos corredores de acesso. Como cada módulo possui 2 m² então é possível colocar até 1.467 módulos nos telhados dos blocos. No projeto realizado, somente 936 m² é suficiente.

Tabela 5-7: Parâmetros do Sistema Solar Fotovoltaico. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor	Unidade
N	468	-
$P_{mp,ref}$	340	W _p
$G_{i,ref}$	1000	W/M ²
γ	-0.004	°C ⁻¹
T_{ref}	25	°C
η_{inv}	98	%
NOCT	43	°C

No item a seguir será apresentada toda a formulação do problema de otimização que envolve o gerenciamento da energia pelo lado da demanda.

5.7 FORMULAÇÃO DO PROBLEMA DE OTIMIZAÇÃO

O método proposto nesta dissertação tem como objetivo realizar o gerenciamento das cargas de refrigeração dos blocos de sala de aula da UFPA, de modo a minimizar os custos energéticos associados à operação deste sistema, sem interferir no conforto térmico das pessoas que estão neste ambiente. Para tal, faz-se necessário realizar o monitoramento da temperatura interna das salas de aula. Para simular o controle local de uma rede inteligente capaz de programar as diferentes estratégias de GLD, utilizou-se o AG (Algoritmo Genético), implementado em ambiente de simulação computacional MATLAB. O AG recebe todos os parâmetros da simulação e de uma base de dados externa, e determina o novo estado da rede conforme a decisão ótima estabelecida. A Figura 5.14 ilustra de forma resumida os parâmetros de entrada e a resposta do AG durante o planejamento da rede.

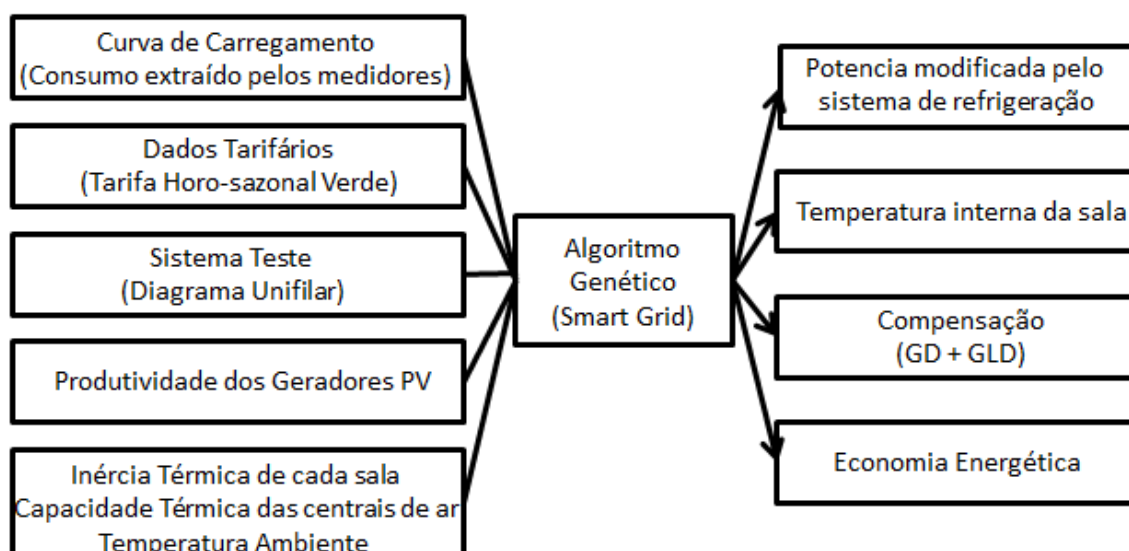


Figura 5.14 – Metodologia de operação do AG. Fonte: Autor.

Nota-se que os dados recebidos externamente são: a curva de carregamento inicial dos blocos de aula, os dados tarifários da unidade consumidora, os dados físicos do sistema teste, a produtividade dos geradores PV conforme demandado pelo cenário, e pôr fim a inércia térmica das salas, a capacidade térmica média dos sistemas de refrigeração (centrais de ar e ar condicionado de janela) e a temperatura ambiente apresentada na Figura 5.11.

Recebendo todos esses dados, o AG calcula a potência modificada pelo sistema de refrigeração, isto é, a nova curva de carregamento após a realização dos deslocamentos de carga para reduzir o custo energético; a temperatura interna da sala considerando os dados térmicos a fim de decidir se a temperatura está em limites aceitáveis ou se o sistema de refrigeração precisa realizar mais trabalho para se adequar aos limites do conforto térmico; a compensação, isto é, a quantidade de carga deslocada ou cortada da curva de carregamento inicial conforme o GLD e/ou a GD estejam em operação e a economia global causada pelo gerenciamento.

Para formulação do problema de otimização, considera-se a função objetivo f como o custo da energia elétrica que se deseja minimizar, conforme equação (5.3) (SIEBERT, AOKI, *et al.*, 2012). Considerou-se o perfil tarifário do campus que já foi apresentado na Figura 5-9 e a demanda atual dos blocos (C_{atual}), na Figura 5.4.

A potência consumida da rede (P_{rede}) varia de acordo com o modo de operação do sistema de refrigeração, e a tarifa considerada ($Tarifa$) é a Horo-Sazonal Verde. Se a temperatura ambiente estiver agradável ou se a potência consumida da rede estiver elevada, a inércia térmica das salas atenderá a carga térmica e o sistema de refrigeração será desligado da rede. Por outro lado, se a temperatura do ambiente estiver próxima de levar a um desconforto térmico no interior das salas, o sistema de refrigeração deve ser ligado para restaurar a temperatura no interior da sala e viabilizar seu desligamento no momento oportuno. Assim, a potência consumida da rede depende da temperatura interna das salas (T_c) e da potencia gerada pelos geradores fotovoltaicos (P_{PV}), e pode ser calculada conforme a equação condicional (5.4). A potência de refrigeração (P_{refri}) é encontrada via otimização por AG com uma estrutura mostrada na Figura 5.15. Os limites foram respeitados conforme se estabeleceu previamente na Tabela 5-9. As restrições de potência e temperatura estão apresentadas nas equações (5.5) e (5.6) respectivamente.

$$f = \min \left\{ \sum_{i=1}^w P_{rede}(i) \times Tarifa(i) \right\} \quad (5.3)$$

$$se \left\{ \begin{array}{l} T_c(i) \leq T_c^{\min}, P_{rede}(i) = 0, 23 \times C_{atual}(i) - P_{PV}(i) \\ T_c(i) \geq T_c^{\max}, P_{rede}(i) = P_{refri}^{\max} + 0, 23 \times C_{atual}(i) - P_{PV}(i) \\ T_c^{\min} \leq T_c(i) \leq T_c^{\max}, P_{rede}(i) = P_{refri}(i) + 0, 23 \times C_{atual}(i) - P_{PV}(i) \end{array} \right\} \quad (5.4)$$

$$T_c^{\min} \leq T_c(i) \leq T_c^{\max} \quad (5.5)$$

$$P_{refri}^{\min} \leq P_{refri}(i) \leq P_{refri}^{\max} \quad (5.6)$$

Na equação condicional (5.4), a constante multiplicadora da demanda atual dos blocos, isto é 0,23, representa a parcela da demanda atual em determinado horário que não é destinada às cargas de refrigeração (iluminação e outros equipamentos), como mostrado na Tabela 5-4.

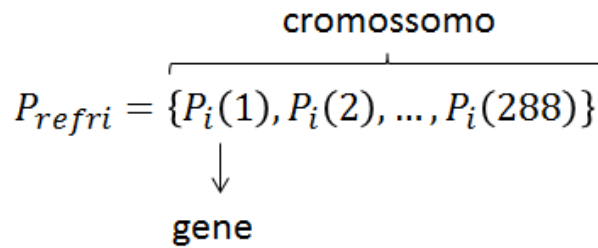


Figura 5.15 – Estrutura de um cromossomo. Fonte: Autor.

Tabela 5-8: Dados da simulação. Fonte: Autor

Parâmetro	Valor	Unidade
P_{refri}^{max}	165	kW
P_{refri}^{min}	0	kW
T_c^{max}	25	°C
T_c^{min}	20	°C

As características adotadas na implementação do AG foram:

1. Os cromossomos foram representados binariamente como mostrados no capítulo 4. Cada cromossomo possui 288 amostras (48 horas) relativas à operação de dois dias seguidos com amostras extraídas a cada 10 minutos. Cada amostra é representada por 10 bits;
2. A cada simulação a população é iniciada aleatoriamente com 100 indivíduos;
3. O número de indivíduos foi mantido a cada simulação;
4. O método da roleta foi considerado para realizar a seleção;
5. Considerou-se um ponto de cruzamento;
6. A taxa de mutação adotada foi de 5%;
7. O critério de parada foi 100 gerações.

CAPÍTULO 6 – RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados todos os resultados relativos à construção e operação planejada da rede de distribuição apresentada no capítulo anterior. Seguindo a metodologia apresentada anteriormente construíram-se alguns cenários de simulação que ajudarão a avaliar de forma mais precisa os impactos causados pelo GLD em conjunto com a Geração Fotovoltaica em uma rede inteligente de nível local hipotética. Além disso, também serão apresentadas todas as ferramentas utilizadas no decorrer do trabalho e todas as discussões a respeito dos resultados obtidos.

6.1 SISTEMA DE DISTRIBUIÇÃO

O sistema de distribuição mostrado na Figura 5.6 foi considerado nas simulações. Neste sistema considerou-se que a carga gerenciada e os geradores fotovoltaicos foram conectados na rede principal por meio de uma subrede mostrada na Figura 5.7. A rede principal possui 149 barras, 81 linhas de transmissão, 68 transformadores e 67 barras de carga modelando as unidades consumidoras. A potência base do sistema é 100 MVA e o resultado detalhado do fluxo de carga segue em anexo. A Figura 6.1 mostra o nível de tensão de todas as barras evidenciando que todas estão distantes de alguma violação de tensão. O fluxo de carga foi calculado via PSAT (*Power System Analyses Toolbox*), uma caixa de ferramentas para análise de redes elétricas do programa MATLAB, considerando um cenário de carga pesada.

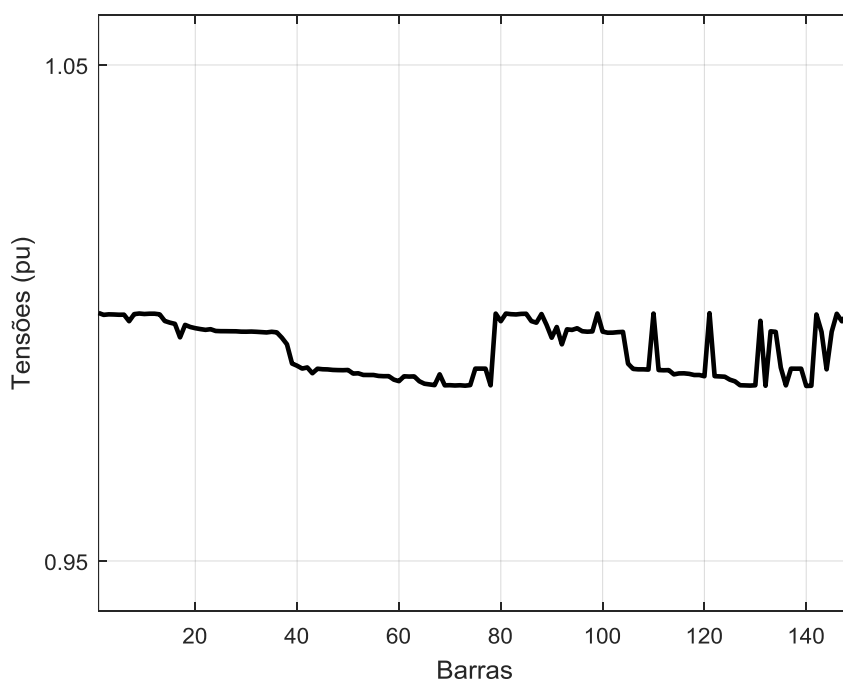


Figura 6.1 – Nível de Tensão das barras da rede principal. Fonte: Autor.

Por fim, o acoplamento entre a subrede em estudo e a rede principal pode ser visto na Figura 6.2.

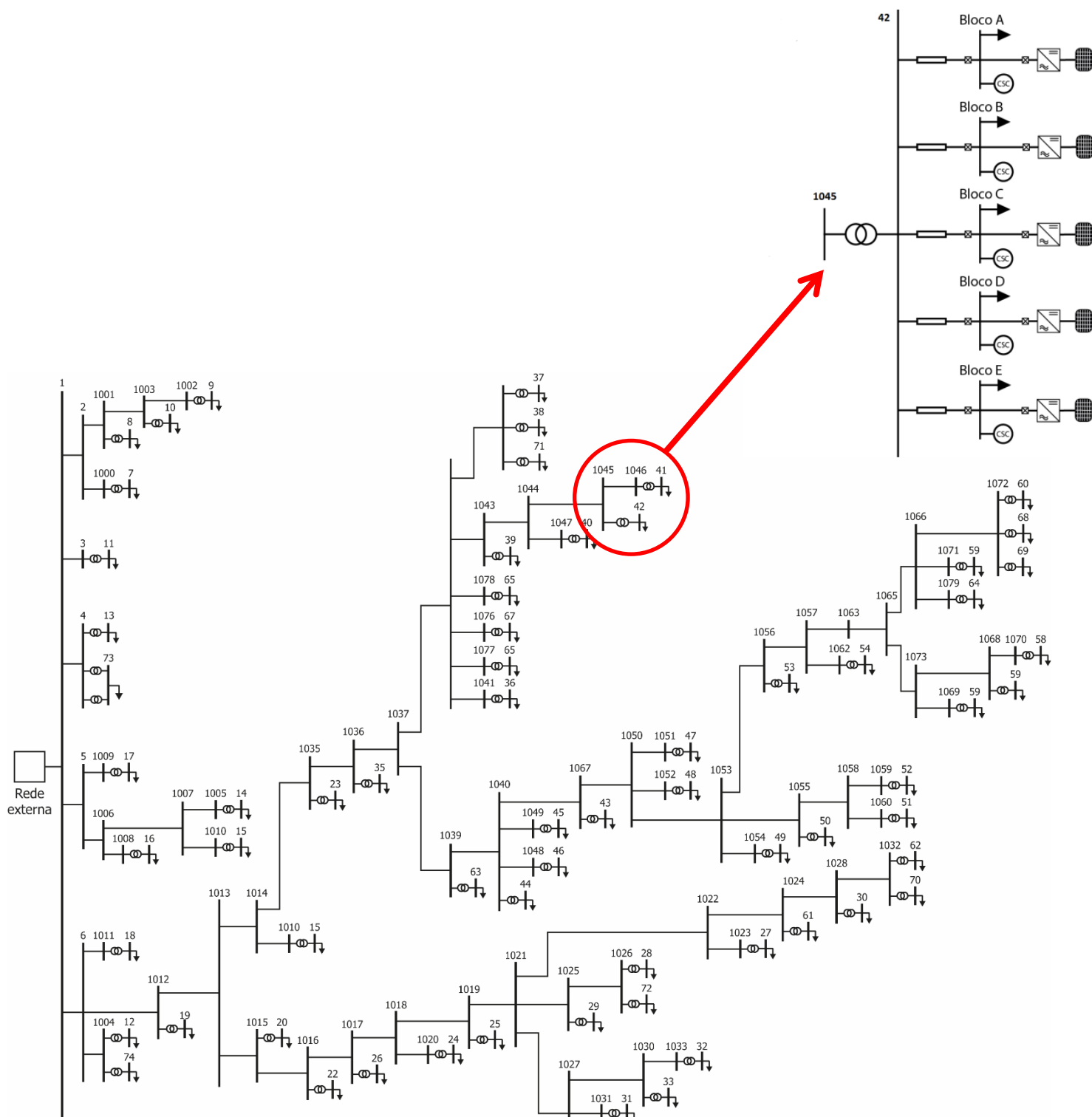


Figura 6.2 – Acoplamento entre a rede principal e a subrede. Fonte: Autor.

6.2 CRIAÇÃO DOS CENÁRIOS

Os cenários foram construídos a fim de avaliar a contribuição de cada estratégia de gerenciamento de carga de forma separada e posteriormente, em conjunto. A Tabela 6-1 mostra todos os cenários montados para a simulação.

Tabela 6-1: Cenários de Simulação. Fonte: Autor.

Cenários	Descrição
Caso 1	É o caso base. Equivale ao sistema atual sem nenhum tipo de gerenciamento de carga.
Caso 2	Neste caso considera-se a conexão da geração fotovoltaica nos blocos de sala de aula.
Caso 3	Neste cenário se realiza o gerenciamento da demanda por meio das cargas de refrigeração e usando a inércia térmica das salas de cada bloco.
Caso 4	No último cenário foram consideradas simultaneamente o gerenciamento da carga de refrigeração e a conexão da geração fotovoltaica.

Em todos os cenários foram analisados o estado de carga da rede principal e da subrede. Também foi monitorada a redução dos custos. Por fim, realizou-se uma comparação entre os quatro cenários propostos.

6.3 CASO 1

Os custos horários associados à demanda energética original estão apresentados na Figura 6.3. Assim, o custo de dois dias de operação dos blocos é aproximadamente R\$ 3.049,70.

Ainda no primeiro caso, utilizando a ferramenta de análise de redes e fluxo de carga PSAT, executou-se o fluxo de carga sucessivas vezes a fim de simular a variação de demanda natural da curva de carga para cada caso. A Figura 6.4 mostra a variação de tensão em pu da barra 42. Observe que o comportamento da tensão é oposto à variação da curva de carga, ou seja, quanto maior o carregamento da rede maior o afundamento de tensão e quanto menor o carregamento da rede, menor o afundamento de tensão. Nota-se que mesmo nos instantes de maior carregamento, o afundamento de tensão não ultrapassou a faixa de 0,988 pu, o que mostra que a operação convencional não viola o nível de tensão da barra de conexão com a rede principal.

A Figura 6.5 mostra a variação das perdas ativas e reativas da rede principal. Nos dois dias de operação as perdas ativas chegam a 932,14 kWh enquanto que as perdas reativas são 366,22 kWh. As perdas totais na verdade são as somas dos valores horários apresentados na Figura 6.5.

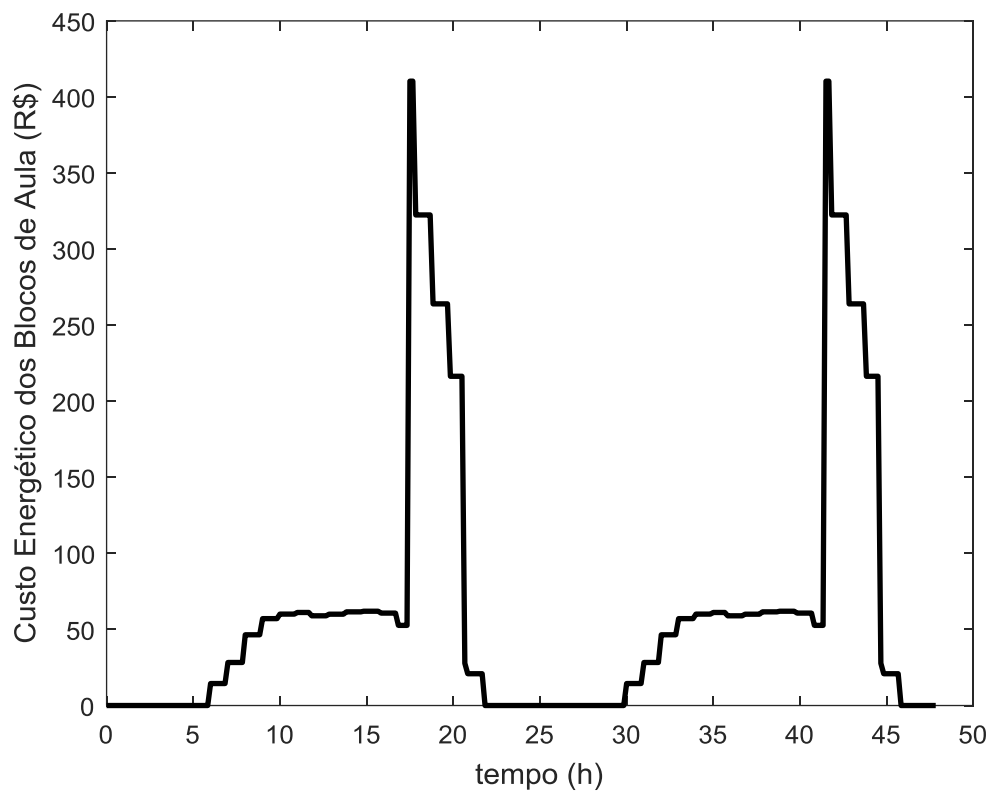


Figura 6.3 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 1. Fonte: Autor.

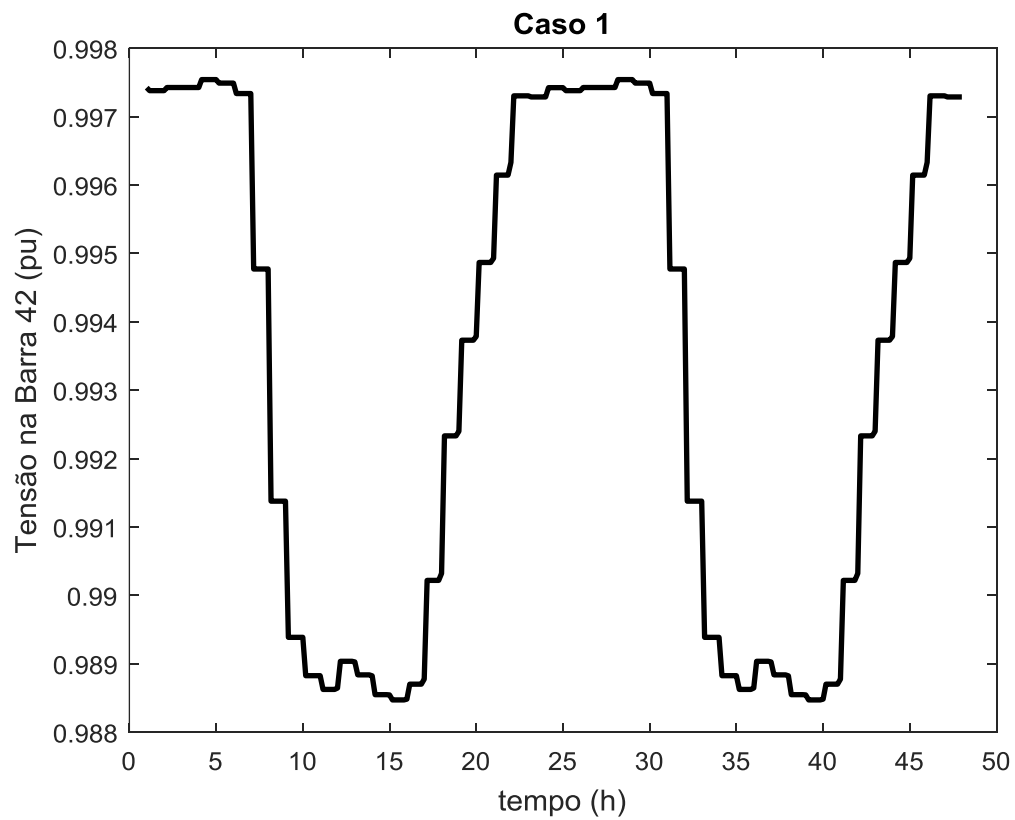


Figura 6.4 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 1. Fonte: Autor.

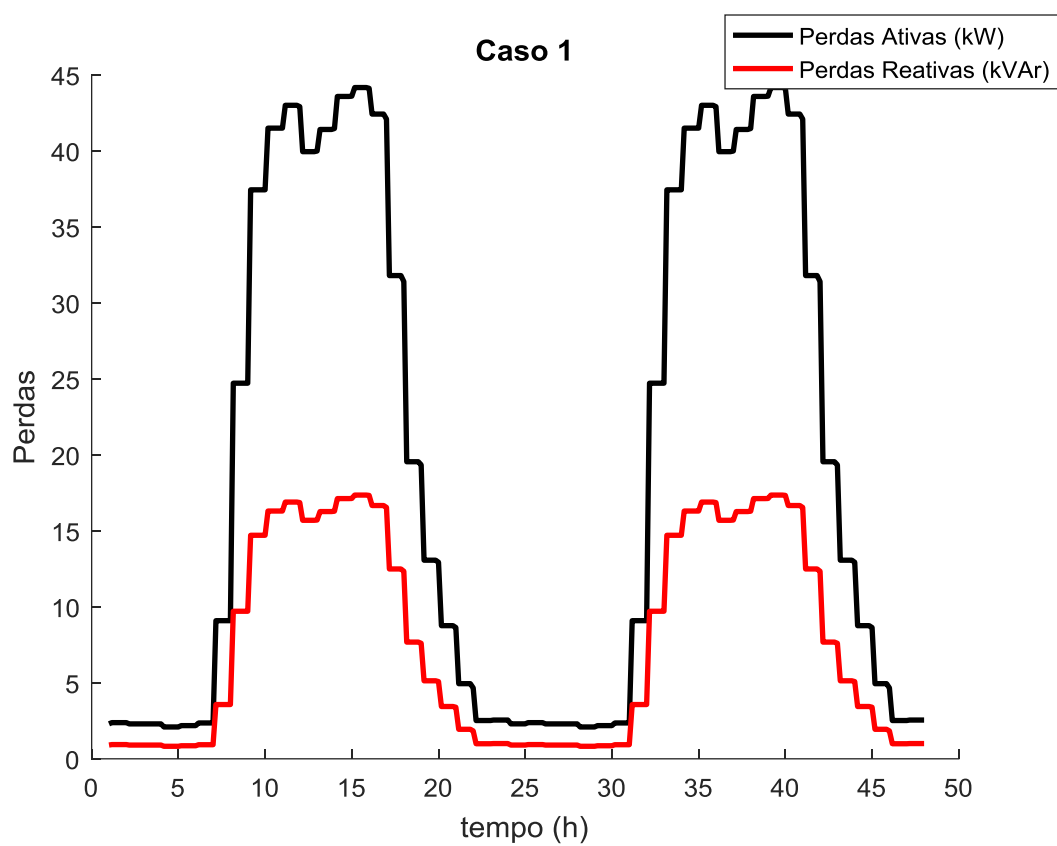


Figura 6.5 – Variação horária das perdas da rede para o caso 1. Fonte: Autor.

6.4 CASO 2

Conforme a Tabela 6-1, o caso 2 se diferencia do caso 1 pela utilização de geração fotovoltaica. Obviamente se espera uma redução considerável dos custos energéticos, sobretudo nos horários fora de ponta devido à natureza da geração fotovoltaica, já que nos horários de ponta não há geração solar substancial. A Figura 6.6 ilustra bem essa redução de pico quando comparada ao caso anterior. Neste caso os custos operacionais reduziram para R\$ 2.439,40 o que representa uma economia de 20% em relação ao caso anterior.

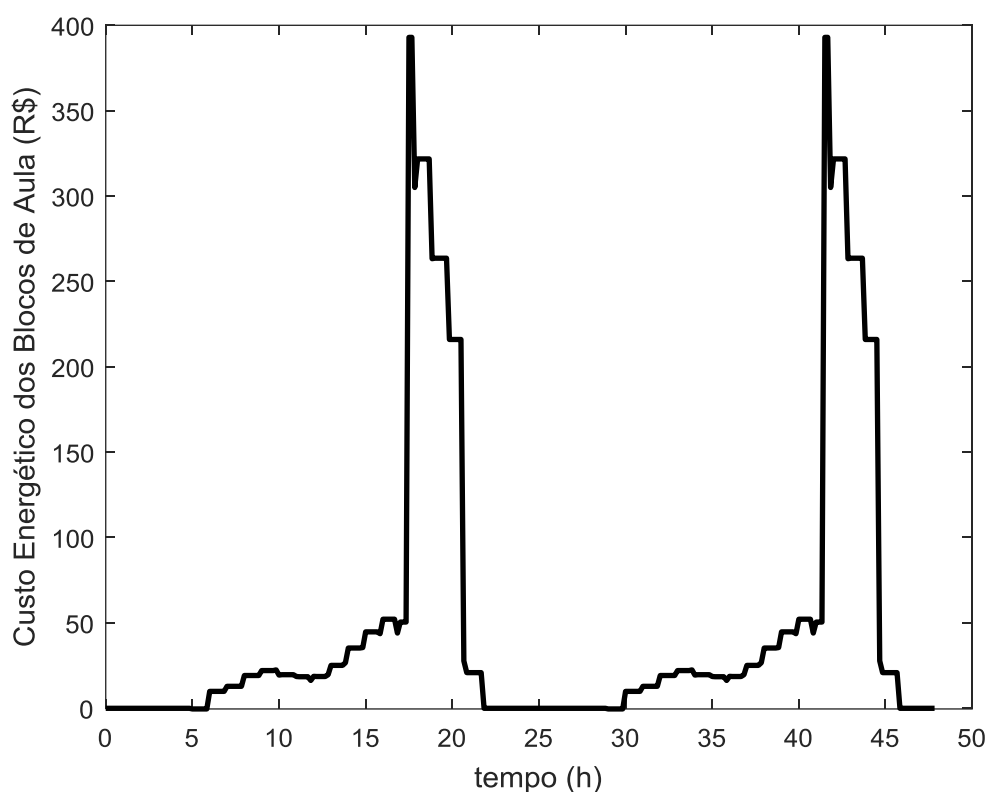


Figura 6.6 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 2. Fonte: Autor.

No caso 2 não existe deslocamento de carga, mas somente corte de pico já que a única estratégia de GLD e a geração fotovoltaica (GD).

A Figura 6.7 apresenta a variação horária da tensão após os sucessivos fluxos de carga. Novamente, não houve violação de tensão nos horários de maior produtividade, mas, ao contrário, o nível de tensão aumentou devido ao alívio da rede por conta do corte de pico.

As perdas horárias da rede estão na Figura 6.8 e a soma dos dois dias de operação chega a 917,81 kWh de perdas ativas e 360,80 kVAr de perdas reativas. Essa redução já era esperada já que virtualmente o sistema está consumindo menos energia da rede principal.

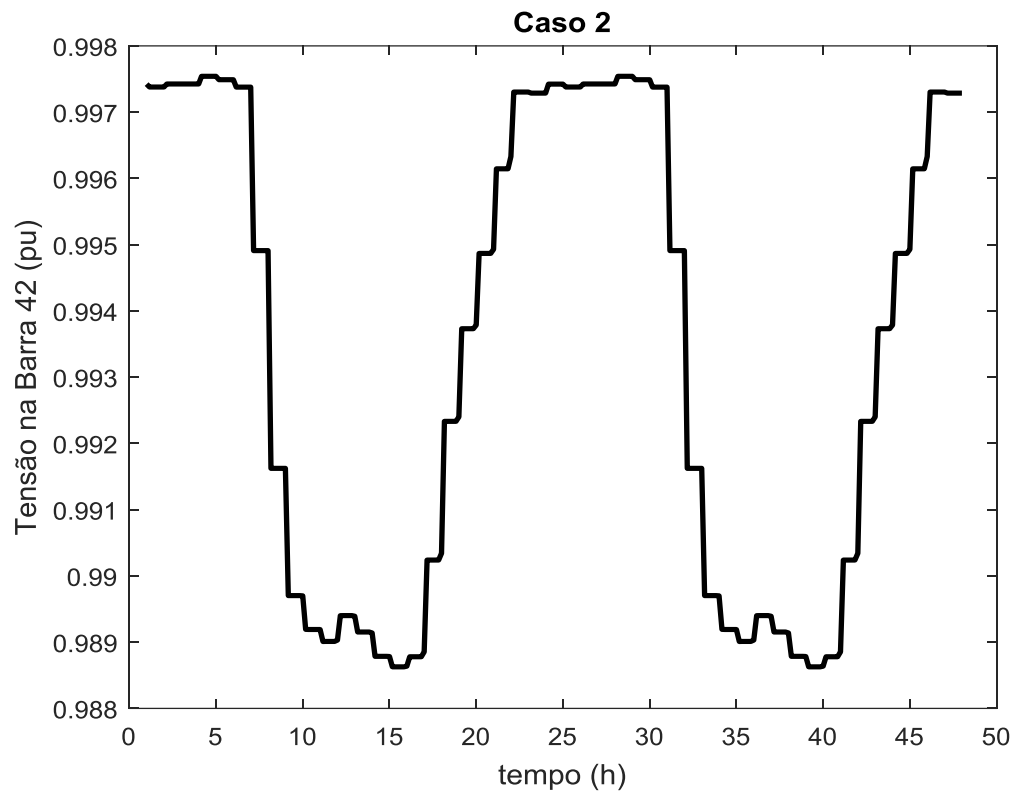


Figura 6.7 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 2. Fonte: Autor.

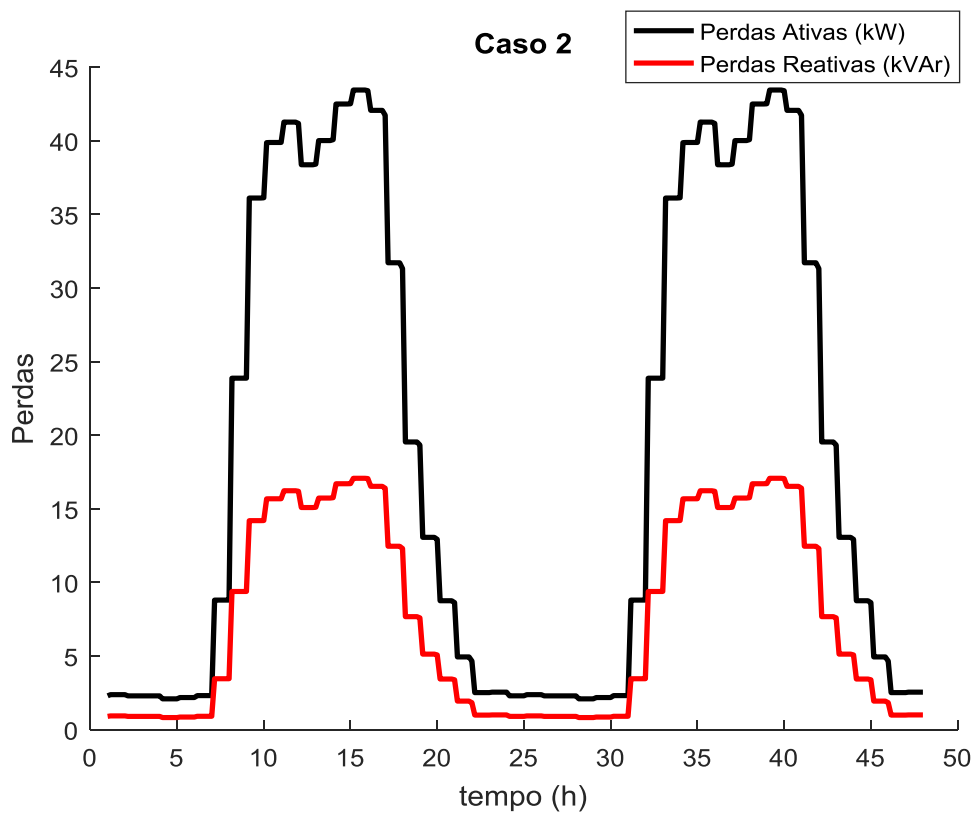


Figura 6.8 – Variação horária das perdas da rede para o caso 2. Fonte: Autor.

6.5 CASO 3

O caso 3 representa o GLD por meio do controle sobre as cargas de refrigeração. Neste caso para que o sistema de distribuição possa ser gerenciado é necessária a existência de um sistema de monitoramento, comunicação e controle, isto é, uma infraestrutura mínima de uma rede inteligente com um controle local dos sinais monitorados durante o gerenciamento. Uma topologia sugerida pode ser vista na Figura 6.9 adaptada a partir da Figura 5.7. Na Figura 6.9 os módulos de medição (M) e de medição e atuação (MA) enviam sinais de potência e temperatura para o controle local que por meio da infraestrutura de rede. O algoritmo genético simula infraestrutura de rede e por isso estabelece os postos horários da potência de refrigeração que levam a maior economia da potência consumida da rede. Conforme a Tabela 6-1 o caso 3 não considera a atuação da geração fotovoltaica, mas somente a atuação do próprio controle local dado pelo AG.

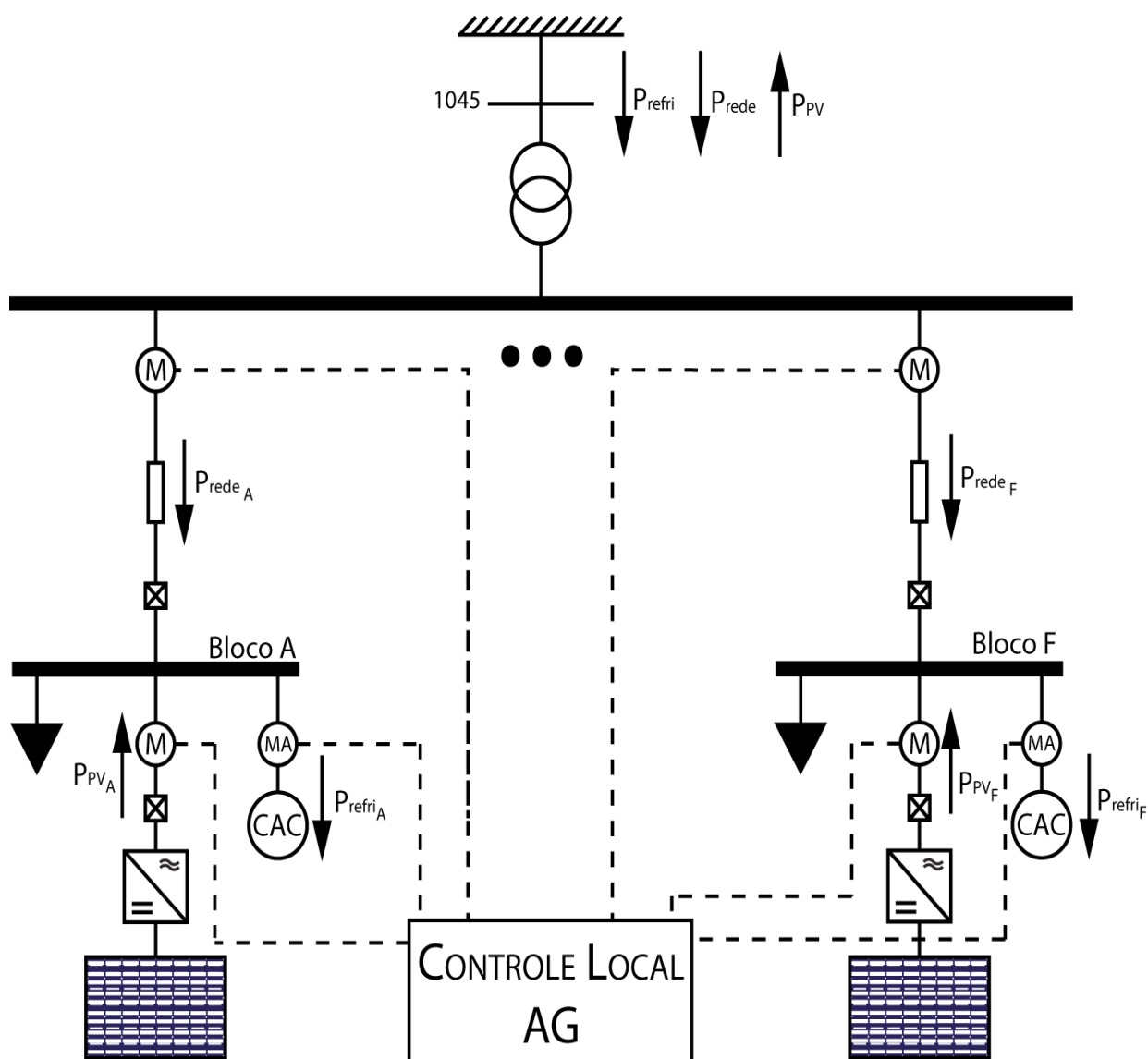


Figura 6.9 – Topologia sugerida para a rede inteligente. Fonte: Autor.

Tendo a topologia apresentada acima, realizaram-se as simulações no AG segundo os parâmetros apresentados na Tabela 6-2.

Tabela 6-2: Parâmetros de simulação do AG para o caso 3. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor
Nº de amostras por cromossomo	288
Nº de bits por amostra	10
Nº de cromossomos da população	100
Nº de simulações	100
Taxa de mutação	0,05
Critério de parada (Nº de gerações)	100

Da Figura 6.10 pode-se observar o valor do custo mínimo da função objetivo em relação a cada simulação executada. O maior custo mínimo ocorreu na décima simulação com o valor de R\$ 2.146,48 e o menor custo mínimo aconteceu na septuagésima terceira simulação com o valor de R\$ 2.017,12. Assim, o custo mínimo médio da função objetivo é R\$ 2.085,74. A Figura 6.11 mostra a evolução da média do custo da função objetivo em valores médio e mínimo ao longo nas 100 gerações tomadas como critério de parada.

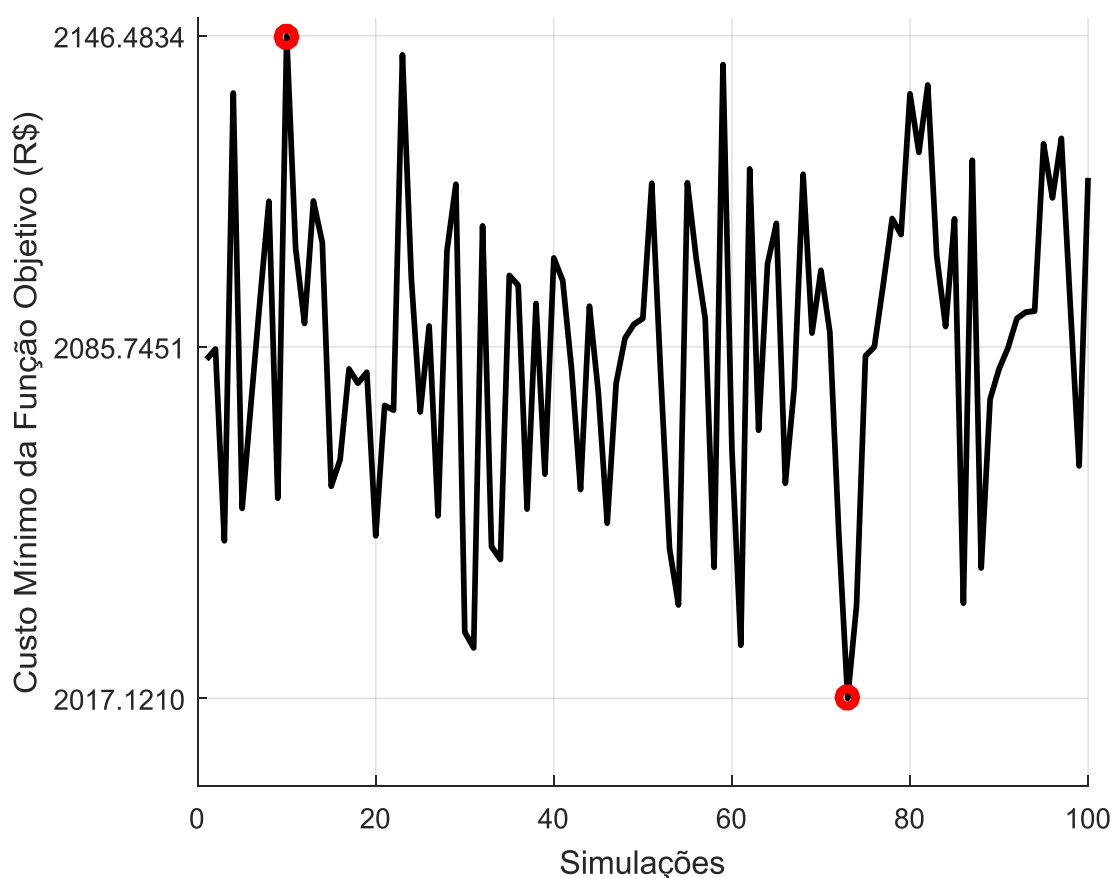


Figura 6.10 – Custo Mínimo encontrado pelo AG em função de cada simulação. Fonte: Autor.

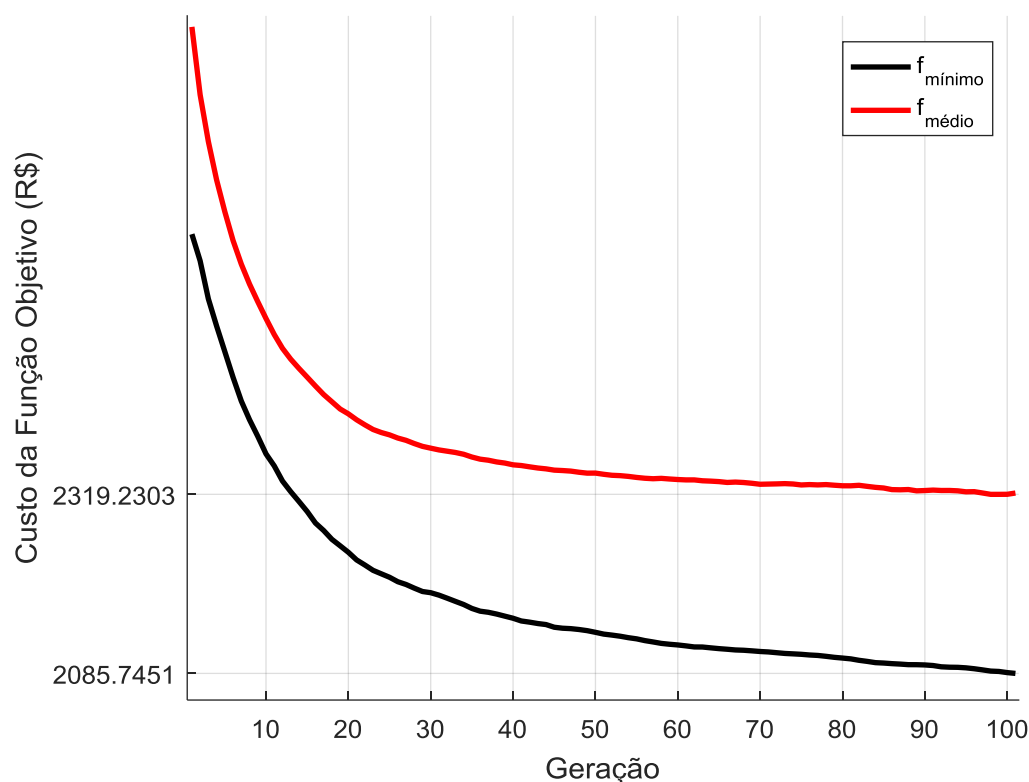


Figura 6.11 – Média das simulações para o custo médio e mínimo da função objetivo. Fonte: Autor.

A Figura 6.12 mostra a evolução dos custos horários após a modificação da curva de demanda da rede causada pelo AG. Pode-se notar que o custo no horário de pico já reduziu consideravelmente devido ao deslocamento de carga.

Para que seja possível visualizar a melhor solução encontrada pelo AG deve-se observar a Figura 6.13 que mostra o perfil de demanda médio das cargas de refrigeração pré-agendadas. Este perfil de consumo é relativo à média do custo mínimo da função objetivo para as 100 simulações realizadas conforme a Figura 6.10.

Como já era esperado, para atender ao objetivo do AG, que é reduzir os custos energéticos dos blocos de aula, o sistema de refrigeração das salas foi agendado para operar inicialmente com maior potência durante a madrugada do primeiro dia de operação, o que atende ao objetivo de reduzir o custo energético dos blocos de aula, pois o deslocamento de carga garante redução de demanda no horário de ponta e diminui a temperatura das salas para condicionar o ambiente interno no momento em que a demanda térmica aumentar devido à chegada dos alunos. No horário de ponta os sistemas de refrigeração podem ser desligados para economizar energia devido ao valor da tarifa estar mais elevado.

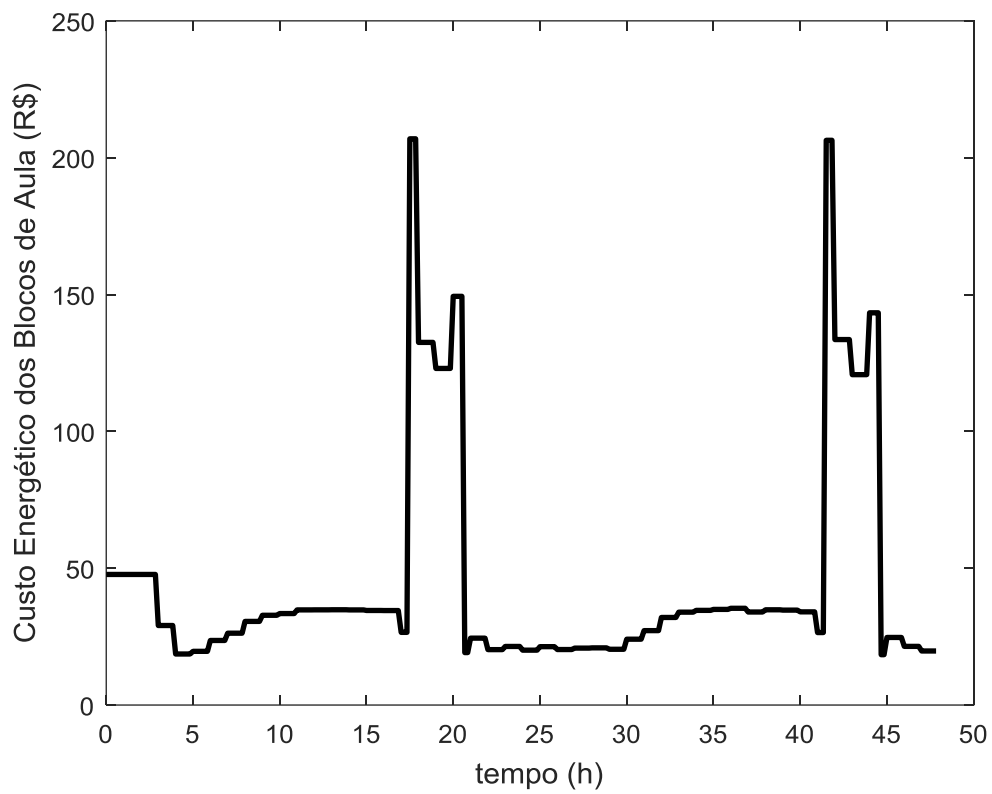


Figura 6.12 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 3. Fonte: Autor.

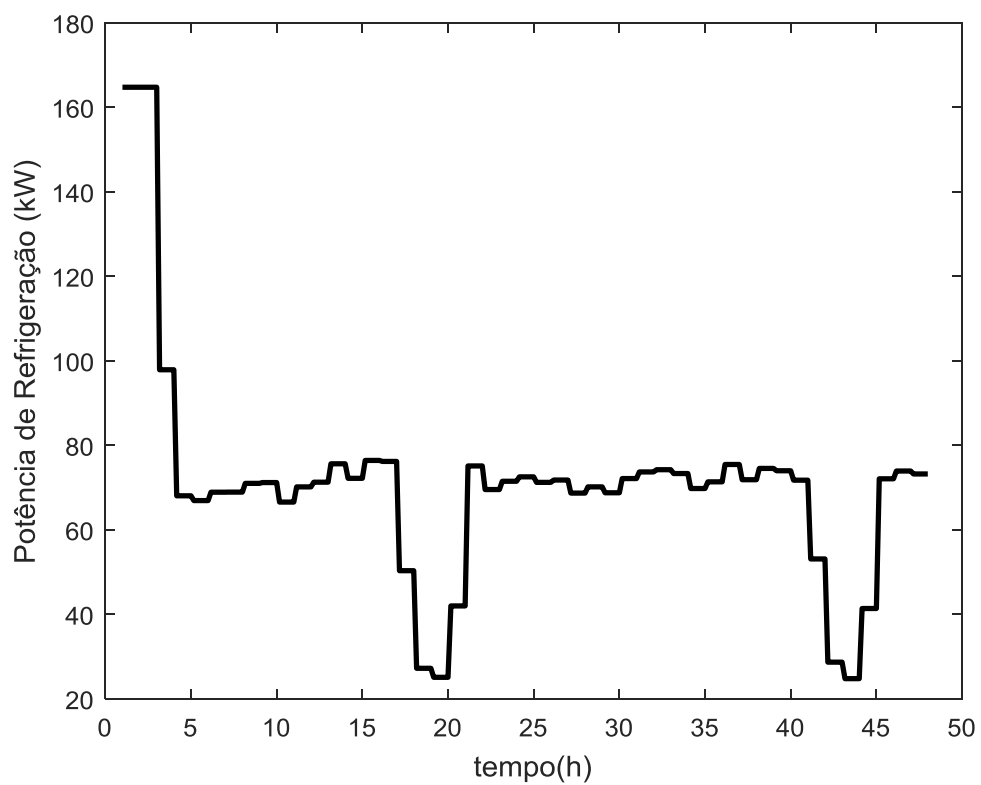


Figura 6.13 – Potencia de refrigeração encontrada pelo AG após as 100 simulações. Fonte: Autor.

Além do sistema de refrigeração, outras cargas também fazem parte da demanda total dos blocos de aula. Por esse motivo, a Figura 6.14 mostra a potência consumida da rede de energia pelos blocos de sala de aula. Como as cargas que não são de refrigeração não podem ser controladas por meio de um controle local automático, a priori, o padrão de consumo da rede se assemelhou mais ao caso 1 do que o padrão de consumo do sistema de refrigeração mostrado na Figura 6.13.

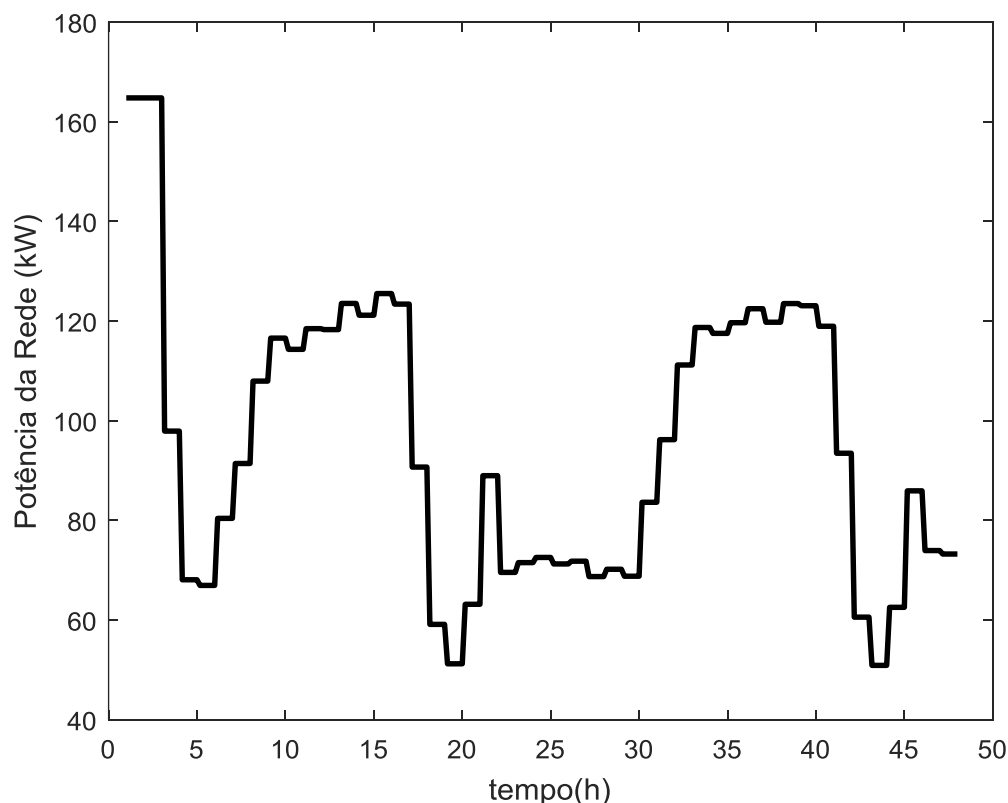


Figura 6.14 – Potência da rede encontrada pelo AG após 100 simulações. Fonte: Autor.

Como o conforto térmico foi modelado como uma restrição durante o processo de busca do AG, as temperaturas das salas devem ser consideradas durante o gerenciamento, por isso a Figura 6.15 apresenta a variação de temperatura interna de uma sala. Conforme foi estabelecido na Tabela 5.9, manter o conforto térmico significa que a temperatura no interior da sala deve variar entre 20°C e 25°C. Nota-se que inicialmente, como a temperatura na madrugada de Belém é superior a 25°C (Figura 5.11) então a temperatura na sala também é superior ao limite máximo, assim, o controle local dado pelo AG decide manter o sistema de refrigeração ligado com potência máxima para baixar a temperatura da sala e armazenar energia térmica. Após três horas de operação a temperatura já se encontra abaixo do limite máximo estabelecido e o sistema já pode trabalhar com uma potência menor. No horário de ponta, a temperatura da sala aumenta devido à redução de potência do sistema de refrigeração, mas como as salas já vem armazenado energia térmica durante uma parte considerável da operação, a variação da temperatura se torna pequena e não compromete o conforto térmico.

Pode-se observar também, através do segundo dia de operação, que a energia térmica armazenada na sala devido à inércia térmica da edificação é suficiente para manter a temperatura baixa mesmo com a diminuição do consumo de energia por parte do sistema de refrigeração. Desta forma, à medida que o tempo de operação do gerenciamento vai aumentando, fica cada vez mais viável o deslocamento de demanda do horário de ponta.

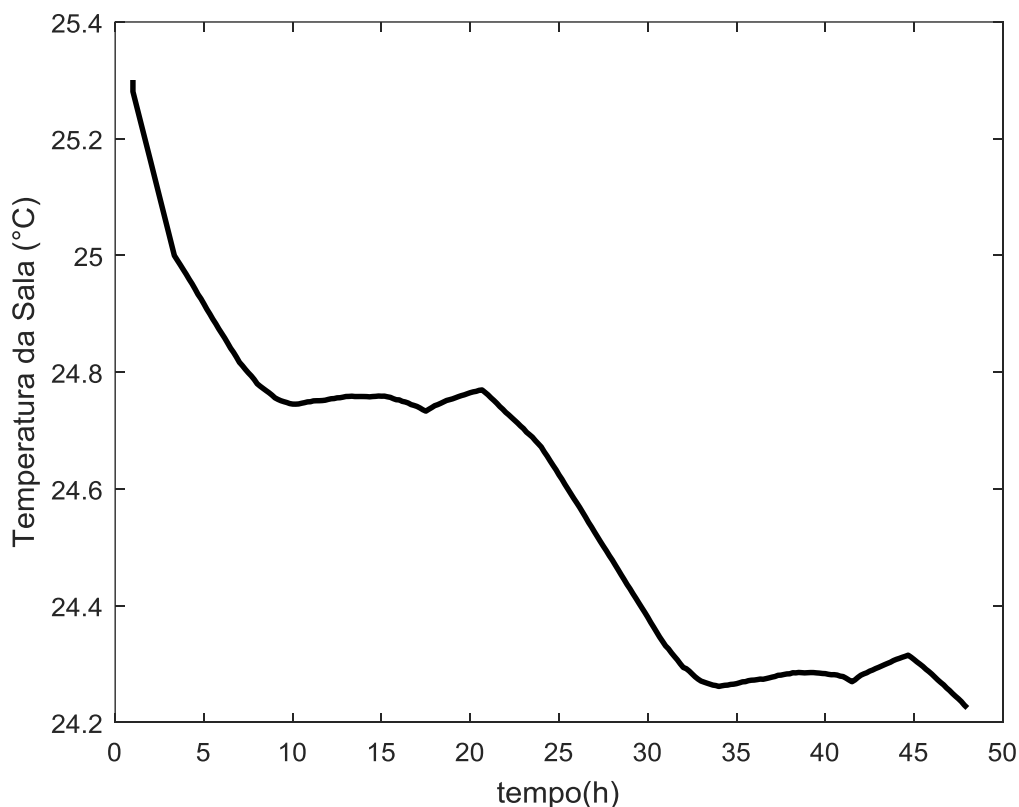


Figura 6.15 – Temperatura interna das salas. Fonte: Autor.

A Figura 6.16 mostra o fluxo de calor para o interior da sala devido à variação de temperatura entre o ambiente externo e o interior da sala aula, assumindo que os instantes de equilíbrio térmico são muito breves e a maior parte do tempo a temperatura do ambiente externo é maior que a temperatura no interior da sala. Por esse motivo, o fluxo de calor para dentro da sala tem o mesmo formato da variação da temperatura do ambiente externo. Além disso, a Figura 6.16 também mostra o fluxo de calor que está sendo colocado para fora do ambiente interno de maneira forçada pelo sistema de refrigeração. Como o calor da sala é retirado pelo sistema de refrigeração, o formato gráfico do fluxo de calor que está sendo expulso do ambiente é o mesmo da potência de refrigeração.

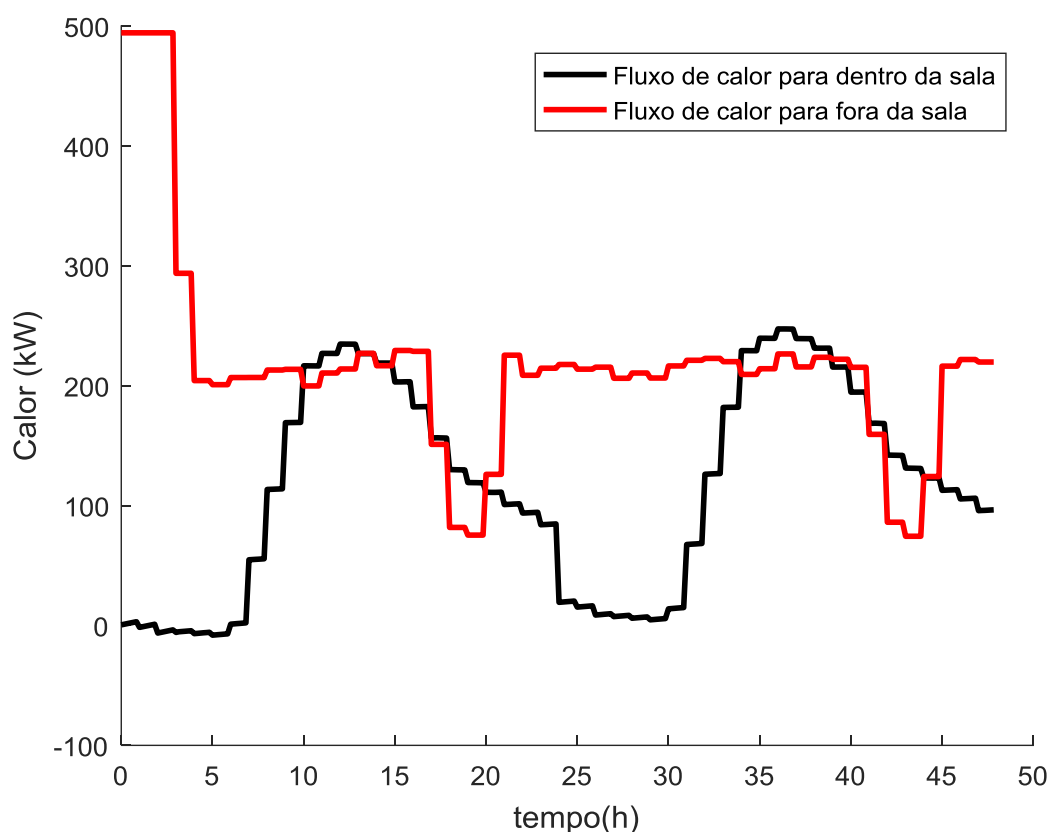


Figura 6.16 – Calor de entrada e de saída das salas de aula. Fonte: Autor.

Com a curva de consumo da subrede após a operação do controle local, se pôde executar os sucessivos fluxos de carga para a rede principal e a variação da tensão na barra 42 pode ser observada na Figura 6.17. Houve uma elevação sutil da tensão na tensão da barra de conexão com a rede principal, portanto, o limite anterior de 0,988 pu ainda se manteve longe de ser violado. Como somente a barra 42 sofreu mudança no perfil de consumo, o perfil de tensão se manteve idêntico aos casos anteriores apesar de haver pequenas variações nos níveis de tensão.

A Figura 6.18 mostra a variação horária das perdas da rede principal. Neste caso as perdas ativas chegaram a 922,33 kWh, o que representa um ganho 9,81 kWh em relação ao caso 1, já que agora com a curva mais suave as perdas diminuíram. Porém, em comparação com o caso 2 houve um aumento nas perdas de 5,24 kWh já que apesar de no caso 3 haver uma maior flexibilização do sistema, não há corte de carga ocasionado pela geração fotovoltaica. De forma semelhante se comportou a potência reativa cuja perda total foi de 362,53 kVArh.

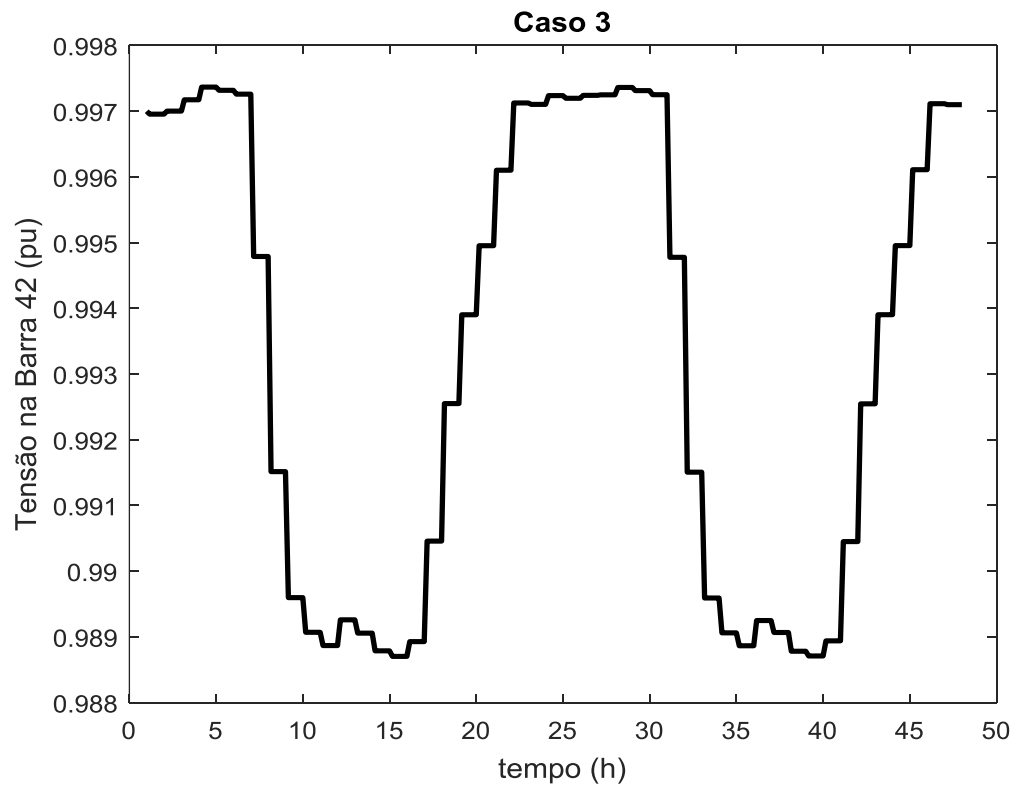


Figura 6.17 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 3. Fonte: Autor.

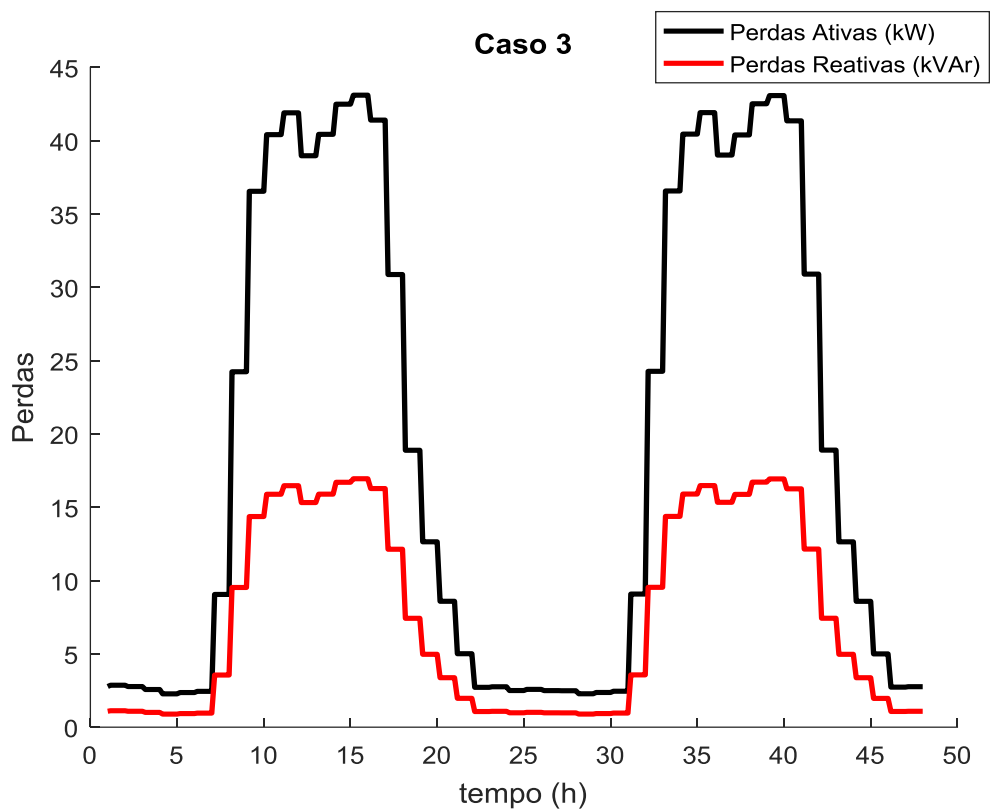


Figura 6.18 – Variação horária das perdas da rede para o caso 3. Fonte: Autor.

6.6 CASO 4

O caso 4 representa a operação do GLD por meio do controle sobre as cargas de refrigeração em conjunto com a operação dos geradores fotovoltaicos. A topologia da rede em questão com o controle local representando a rede inteligente é a mesma apresentada na Figura 6.9. Considerando que nenhum outro parâmetro do AG foi modificado a Tabela 6-3 mostra todos os parâmetros do AG considerados nas simulações referentes a este caso.

Tabela 6-3: Parâmetros de simulação do AG para o caso 4. Fonte: Autor.

Parâmetro	Valor
Nº de amostras por cromossomo	288
Nº de bits por amostra	10
Nº de cromossomos da população	100
Nº de simulações	100
Taxa de mutação	0,05
Critério de parada (Nº de gerações)	100

A Figura 6.19 mostra a evolução do custo mínimo da função objetivo ao longo das 100 simulações realizadas. Na Figura 6.19 está sinalizado o máximo custo mínimo da função objetivo que ocorreu na quadragésima sétima simulação com o valor de R\$ 1.734,41, o mínimo custo mínimo ocorrido na quinquagésima segunda simulação com o valor de R\$ 1.615,45 e o valor mínimo médio que é a média aritmética das 100 simulações e, portanto, o valor considerado como a resposta final do AG foi R\$ 1.679,06.

A Figura 6.20 mostra a evolução ao longo das gerações da média das 100 simulações do custo mínimo e médio da função objetivo, o que confirma o resultado apresentado na Figura 6.19.

A Figura 6.21 mostra os custos horários da operação do caso 4. Pode-se notar que entre as 9 horas e as 13 horas a carga do sistema está deslocada, diferente do caso 2, coincidindo com o instante de aumento da produtividade da GD por isso os custos se tornaram negativos, isto é, a subrede está produzindo mais energia do que consome, enviando a energia excedente para a rede principal.

A Figura 6.22 mostra a variação da potência de refrigeração obtida pelo controle local. Se pode notar que praticamente não houve variação considerável em relação ao caso 3 o que confirma a resposta do caso anterior. A mudança do perfil da Figura 6.22 em relação à Figura 6.13 pode ser atribuída mais a natureza aleatória do AG, que foi grandemente evitada pelas 100 simulações realizadas, mas não pode ser desconsiderada. A redução de custos se deve majoritariamente pela utilização da GD em relação ao caso 3 e pelo conjunto do controle local associado com a GD em relação ao caso 1.

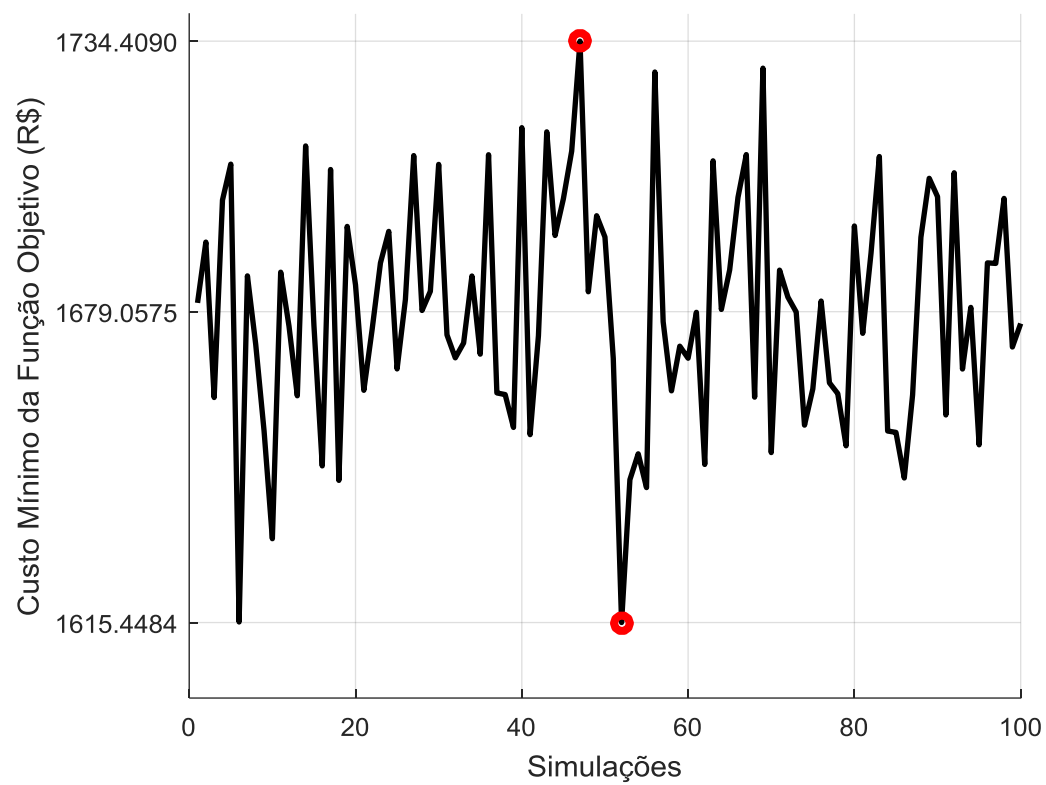


Figura 6.19 – Custo Mínimo encontrado pelo AG em função de cada simulação. Fonte: Autor.

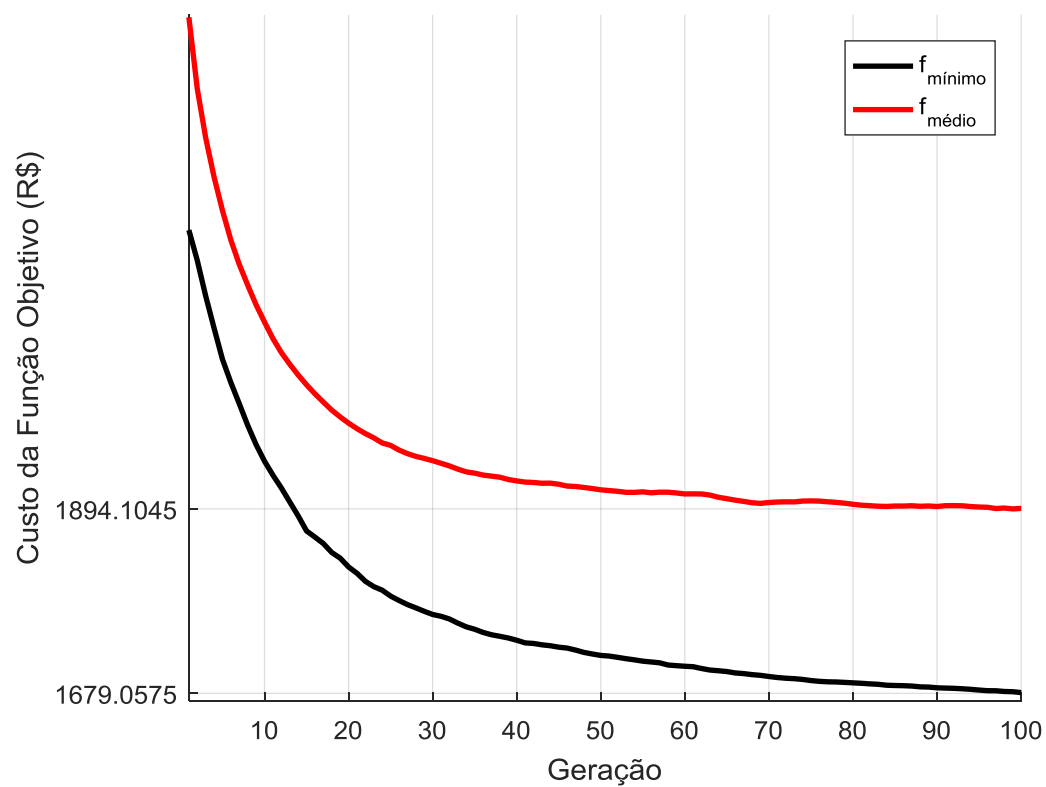


Figura 6.20 – Média das simulações para o custo médio e mínimo da função objetivo. Fonte: Autor.

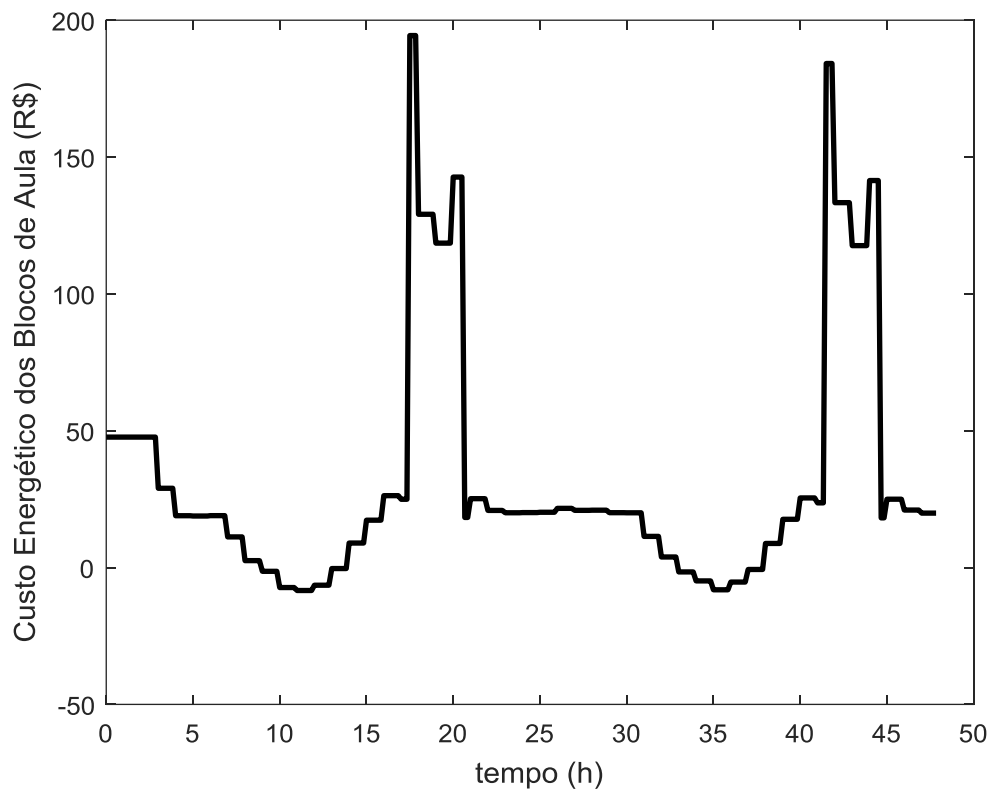


Figura 6.21 – Custo horário da operação dos blocos para o caso 4. Fonte: Autor.

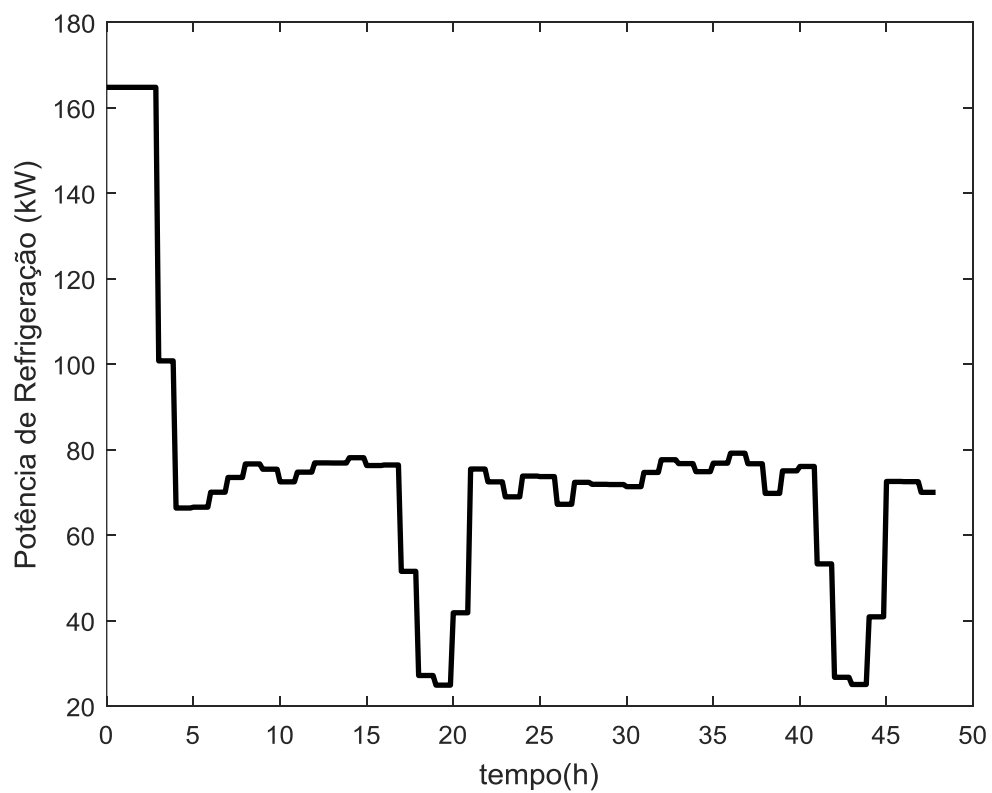


Figura 6.22 – Potência de refrigeração encontrada pelo AG após as 100 simulações. Fonte: Autor.

Diferente do que aconteceu no caso 3, apresentado na Figura 6.14, a potência da rede mostrada na Figura 6.23 sofreu uma variação considerável devido à atuação do deslocamento de carga vindo do controle local, via AG (GLD) em conjunto com a GD como foi argumentado anteriormente.

A Figura 6.24 mostra a variação da temperatura que novamente não sofreu variação fora dos limites pré-estabelecidos após o início do funcionamento das cargas de refrigeração. Também não houve variação considerável em relação ao caso anterior e a variação da temperatura no horário de ponta, onde a demanda do sistema encontra-se consideravelmente mais baixa, evidenciando o procedimento de armazenamento térmico devido à inércia térmica da sala.

A Figura 6.25 apresenta o fluxo de calor para dentro das salas e o fluxo de calor para fora das salas. Como não houve nenhuma mudança na temperatura ambiente externa, somente uma leve variação da temperatura interior da sala então, não houve variação considerável no calor que entra nas salas. Da mesma forma, considerou-se o mesmo coeficiente de desempenho das simulações anteriores, por isso não houve grandes mudanças na quantidade de calor que é expulsa da sala de maneira forçada.

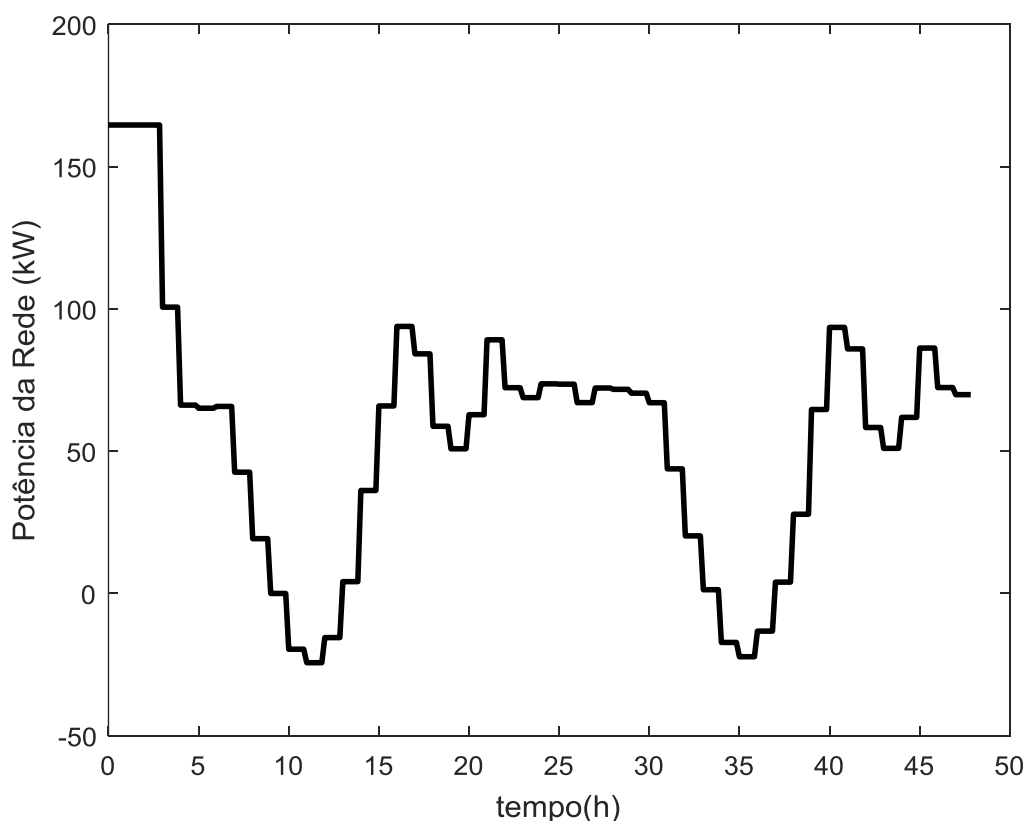


Figura 6.23 – Potência da rede encontrada pelo AG após 100 simulações. Fonte: Autor.

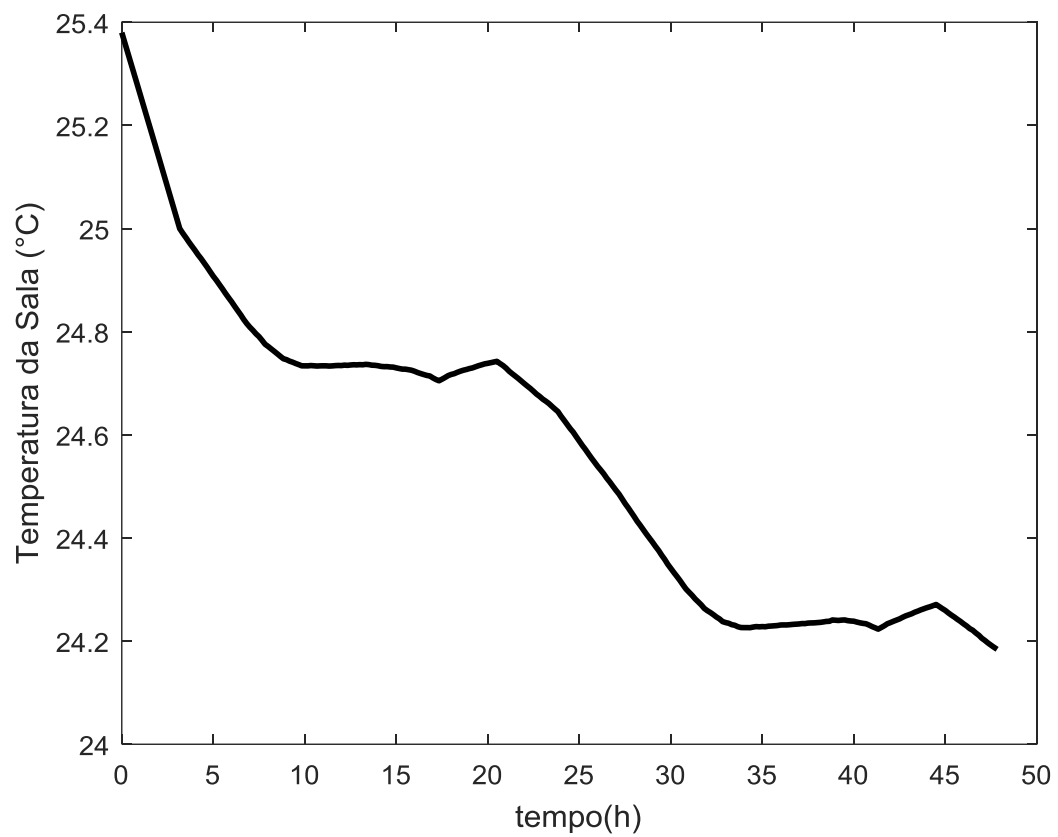


Figura 6.24 – Temperatura interna das salas. Fonte: Autor.

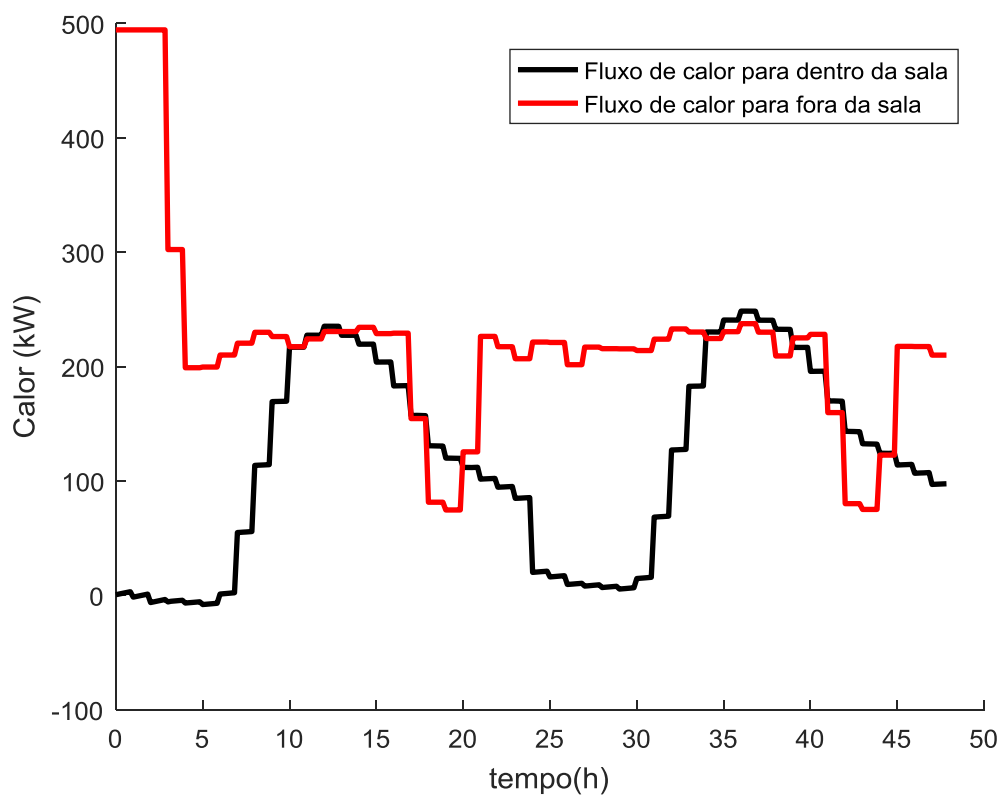


Figura 6.25 – Calor de entrada e de saída das salas de aula. Fonte: Autor.

Por fim, assim como nos casos anteriores, o caso 4 não provocou variação considerável no nível de tensão da barra 42, como mostra a Figura 6.26, e as perdas totais da rede continuaram caindo devido à atuação conjunta do controle local e da GD. No caso 4 as perdas ativas foram 901,43 kWh nos dois dias de operação registrando as menores perdas globais. Da mesma forma as perdas de potência reativa chegaram a 354,52 kVAr. A Figura 6.27 mostra o histórico de variação das perdas para o caso 4.

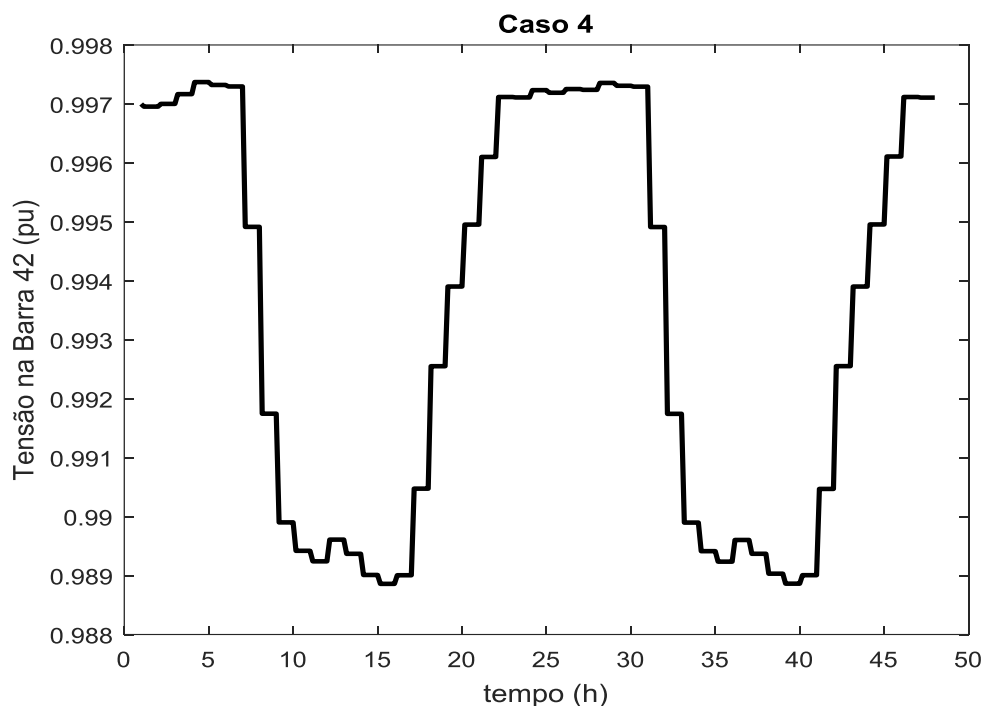


Figura 6.26 – Variação horária de tensão na barra 42 para o caso 4. Fonte: Autor.

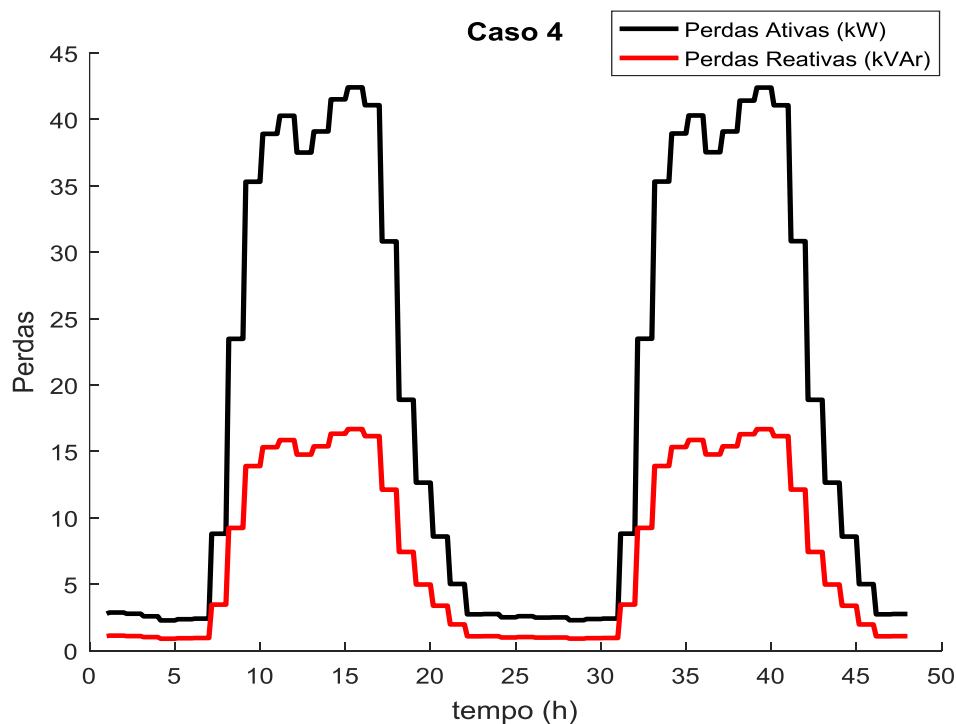


Figura 6.27 – Variação horária das perdas da rede para o caso 4. Fonte: Autor.

6.7 COMPARAÇÃO DOS CASOS

O último tópico deste capítulo é uma breve comparação entre todos os casos apresentados na Tabela 6-1. Assim, fica mais intuitiva a compreensão acerca dos benefícios da aplicação do GLD em uma rede inteligente.

A Figura 6.28 mostra o fator de demanda utilizado para modelar a curva de carga da subrede em cada caso. A curva do caso 1 representa o carregamento atual; a curva do caso 2 é a diferença entre a curva de carregamento atual e a curva de produtividade dos geradores fotovoltaicos; a curva do caso 3 foi sugerida pelo controle local via AG desconsiderando os geradores fotovoltaicos e a curva do caso 4 também é uma sugestão da ferramenta de controle local da rede inteligente hipotética, porém, considerando a atuação dos geradores fotovoltaicos como mais uma ferramenta de gerenciamento pelo lado da demanda.

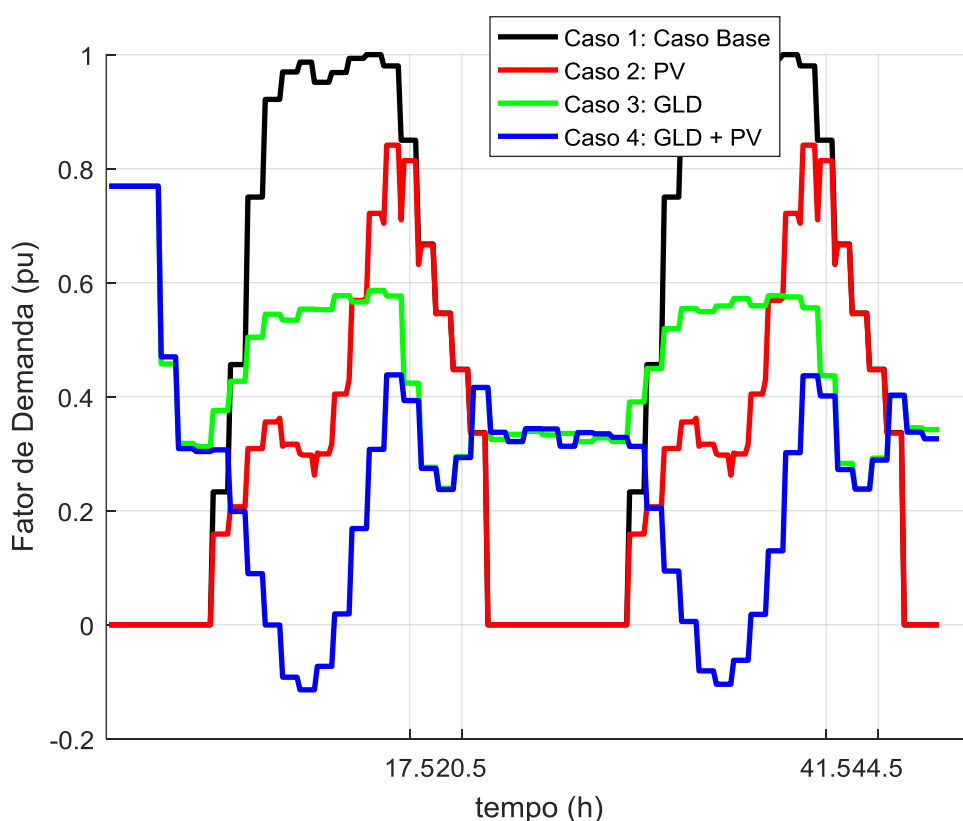


Figura 6.28 – Fator de demanda para todos os casos. Fonte: Autor.

A Tabela 6-4 resume os custos de operação obtidos em cada caso bem como o percentual de economia de cada caso em relação ao caso base. Também são apresentadas as perdas ativas e reativas em cada caso. O cenário que representou maior economia foi o caso 4, totalizando R\$1.679,06 com a operação de dois dias, o que significa 45% de redução em relação ao caso 1. Assim, o maior benefício econômico, com menores perdas para a rede principal e maior eficiência de carga foi o caso 4 que combina o GLD via deslocamento de carga e via redução de pico através da conexão de geração fotovoltaica.

Tabela 6-4: Resumo dos cenários apresentados. Fonte: Autor.

	Caso 1 (Caso Base)	Caso 2 (PV)	Caso 3 (GLD)	Caso 4 (GLD + PV)
Custos (R\$)	R\$ 3.049,70	R\$ 2.439,40	R\$ 2.085,74	R\$ 1.679,06
Redução em Relação ao Caso 1 (%)	0%	20%	32%	45%
Perdas Ativas (kWh)	932,14	917,09	922,33	901,43
Perdas Reativas (kVArh)	366,22	360,52	362,53	354,52

A Figura 6.29 mostra a variação do custo horário para todos os casos, evidenciando que o caso 1 apresenta os maiores custos de operação enquanto que o caso 4 possui os menores custos. O caso 2 é mais econômico que o caso 1 por conta da produtividade fora do horário de ponta. O caso 3 é mais econômico que o caso 1 por conta da redução de demanda nos horários de ponta e fora de ponta e mais econômico que o caso 2 por conta da redução no horário de ponta. O caso 4 é mais econômico que os casos 1 e 2 pela redução de demanda nos horários de ponta e fora de ponta e mais econômico que o caso 3 pelo baixo consumo fora do horário de ponta.

A Figura 6.30 mostra a comparação da melhor solução, isto é, a curva de demanda de refrigeração média, associada à média dos custos mínimos para os casos 3 e 4. Como foi mostrado anteriormente, não houve uma mudança considerável na curva de demanda de refrigeração tanto nos horários de ponta como nos horários fora de ponta. Fica claro também que após a temperatura entrar no limite estabelecido no capítulo anterior, a demanda do sistema de refrigeração é a mínima que garanta o conforto térmico. Além disso, apesar do caso 4 apresentar um consumo energético levemente superior ao caso 3, à economia de energia é maior porque este aumento de consumo é atendido pela GD nos instantes de maior produtividade.

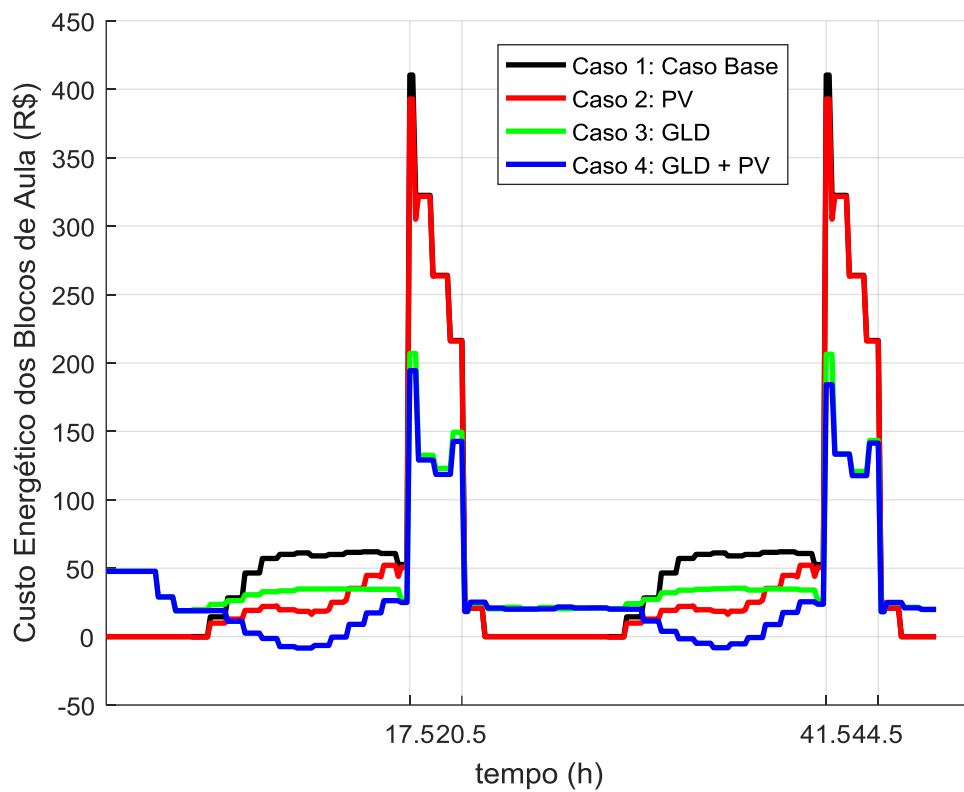


Figura 6.29 – Custo horário da operação dos blocos para todos os casos. Fonte: Autor.

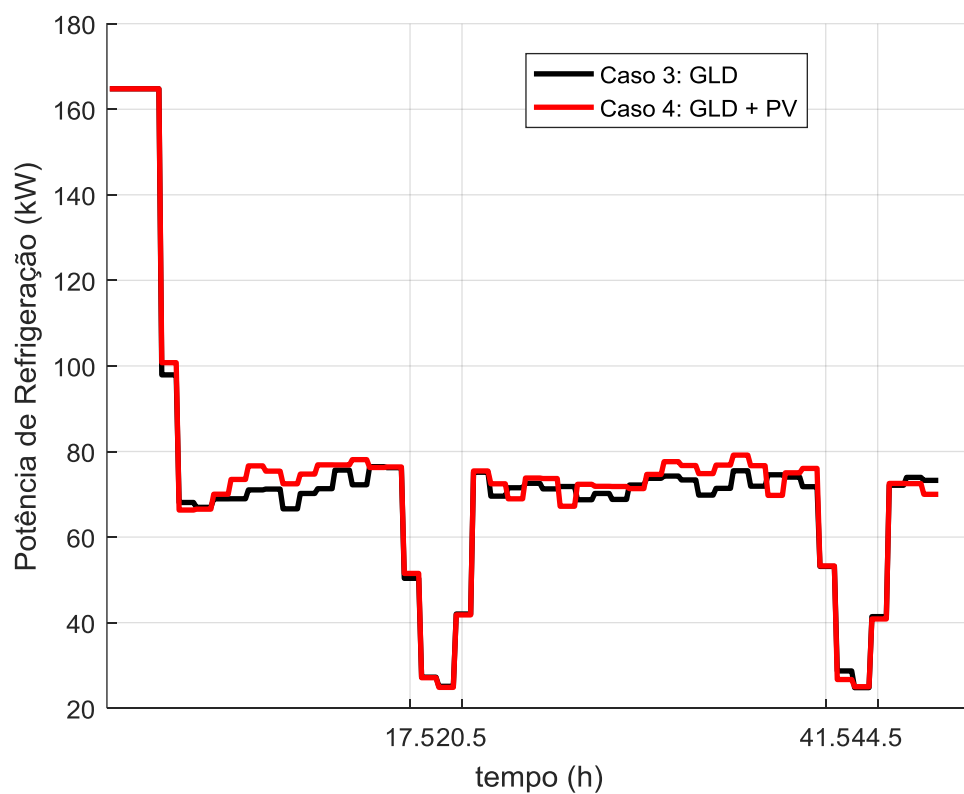


Figura 6.30 – Comparação entre os casos 3 e 4 da potência de refrigeração encontrada pelo AG. Fonte: Autor.

Considerando a demanda da rede, fica claro que os casos só diferem por conta da GD já que a estratégia de controle local da demanda simulada pelo AG se manteve independentemente da existência de GD, como mostra a Figura 6.30, houve uma leve redução de demanda no horário de ponta do segundo dia, provavelmente pela redução de demanda do cenário em relação ao dia anterior já que a temperatura da sala se manteve dentro dos limites ao longo de toda a extensão do segundo dia. Neste sentido se poderiam esperar reduções mais perceptíveis em cenários que envolvem mais dias de planejamento. Esta característica é confirmada através da Figura 6.31 que mostra o comportamento da demanda da rede.

A Figura 6.32 mostra que independente dos cenários de otimização, não houve violação da temperatura interna das salas, que na formulação original representa a restrição de conforto térmico. Como no caso 4 houve maior consumo por parte das cargas de refrigeração, neste mesmo caso, as temperaturas ficaram ligeiramente abaixo em comparação ao caso 3.

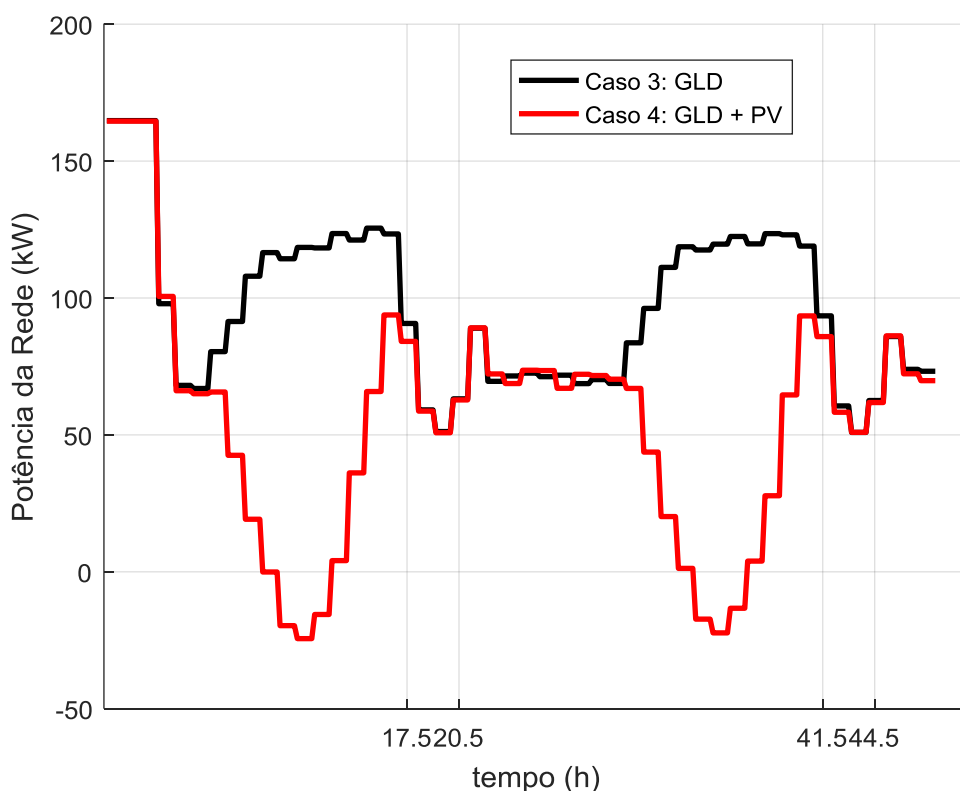


Figura 6.31 – Comparação entre os casos 3 e 4 da potência da rede encontrada pelo AG. Fonte: Autor.

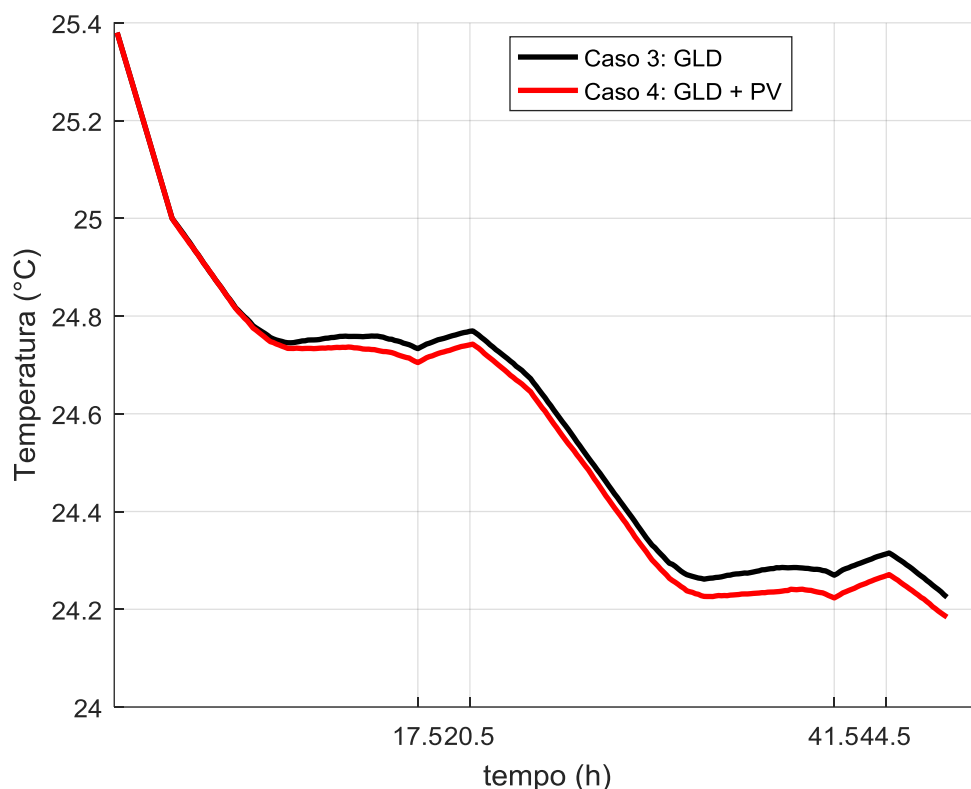


Figura 6.32 – Comparação entre os casos 3 e 4 de temperatura interna das salas. Fonte: Autor.

A Figura 6.33 compara a temperatura do ambiente externo com a temperatura das salas de aula. Observando os horários fora de ponta se pode notar que o pico de demanda das unidades consumidoras ocorre no mesmo período em que a temperatura do dia está aumentando o que consequentemente aumentaria a demanda do sistema de refrigeração, porém, como o controle local optou por ligar o sistema de refrigeração antes do aumento de demanda, a energia já vinha sendo acumulada na madrugada, por isso não houve variação considerável da temperatura da sala. Já nos horários de ponta o sistema de refrigeração irá reduzir consideravelmente sua demanda para garantir maior economia no planejamento da rede, positivamente, a temperatura ambiente está em queda neste horário, o que reduz o trabalho termodinâmico para retirar o calor vindo do ambiente para fora da sala, assim a temperatura da sala sobe muito lentamente, não comprometendo o conforto térmico.

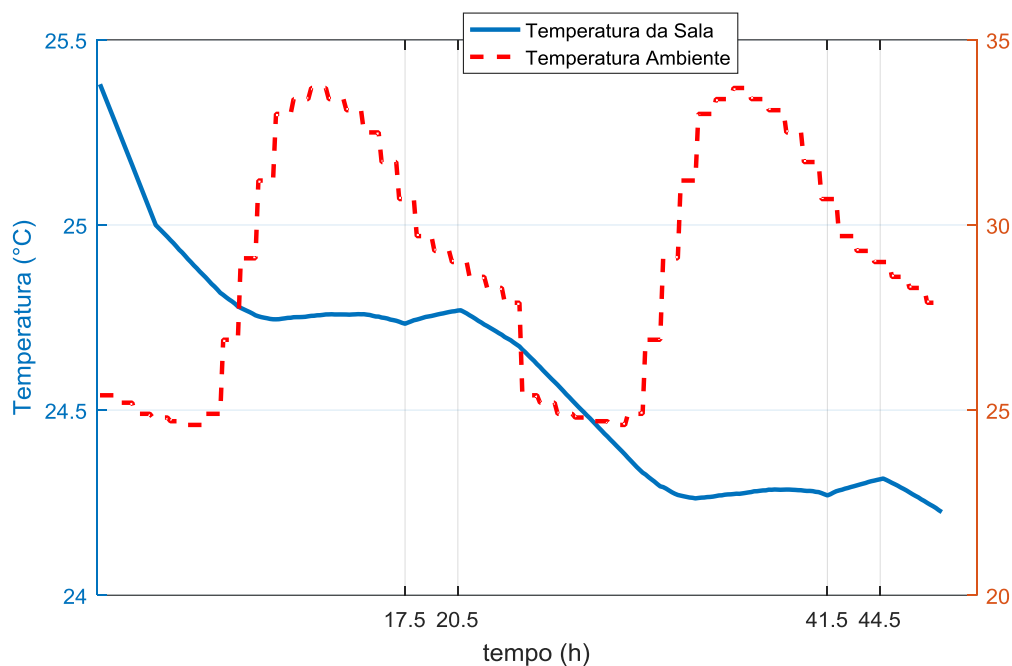


Figura 6.33 – Comparação entre a temperatura ambiente e a temperatura das salas de aula para o caso 3.
Fonte: Autor.

Como foi analisado anteriormente, já que se considerou a mesma dinâmica de variação da temperatura, não houve variação do fluxo de calor de entrada do ambiente externo para dentro das salas de aula, como mostra a Figura 6.34. Porém, como houve maior consumo do sistema de refrigeração no caso 4 em comparação ao caso 3, houve uma maior retirada de calor de dentro das salas de aula para o ambiente externo no caso 4, sobretudo no horário fora de ponta, como mostra a Figura 6.35.

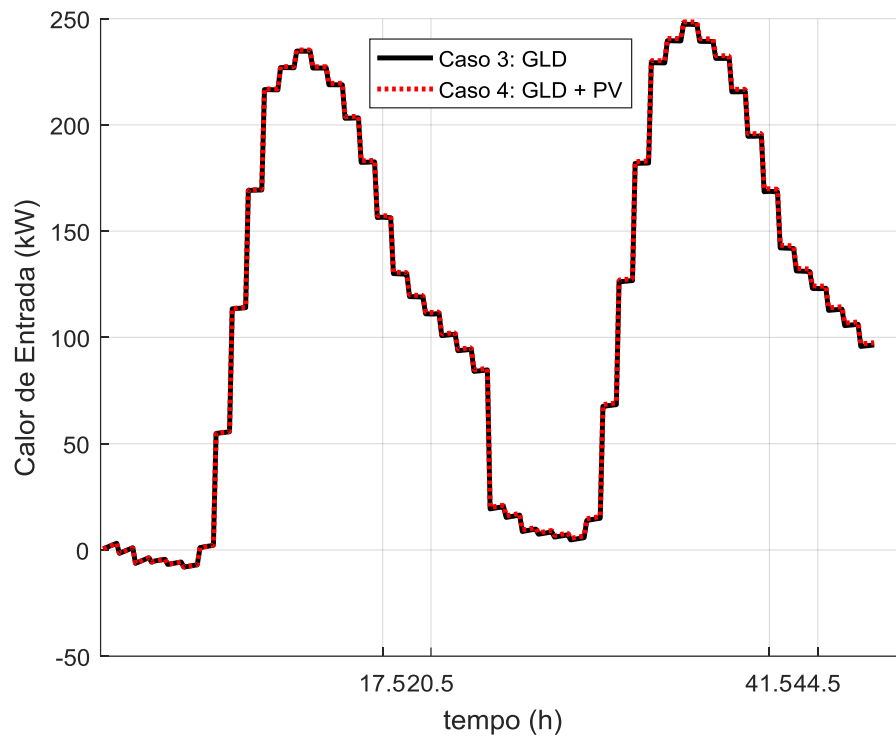


Figura 6.34 – Comparação entre os casos 3 e 4 do calor de entrada das salas. Fonte: Autor.

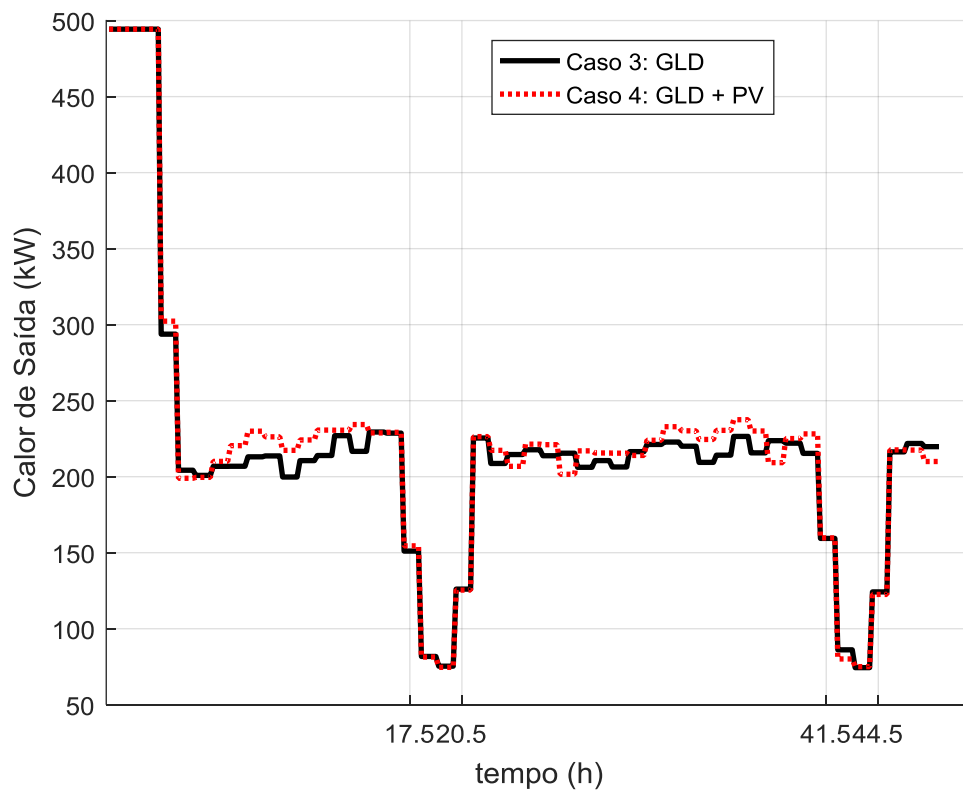


Figura 6.35 – Comparação entre os casos 3 e 4 do calor de saída das salas. Fonte: Autor.

Por fim, a última comparação ocorreu em relação ao estado da rede nos quatro cenários via fluxo de carga.

A Figura 6.36 mostra a variação horária da tensão na barra 42 para os quatro casos. Somente houve variação considerável das tensões no início da operação do controle local, isto é, casos 3 e 4 em comparação aos casos sem controle. No final do dia a início da tarde houve maior distribuição de carga e o caso 4 foi o que apresentou menor afundamento de tensão enquanto que o caso 1 teve o maior afundamento.

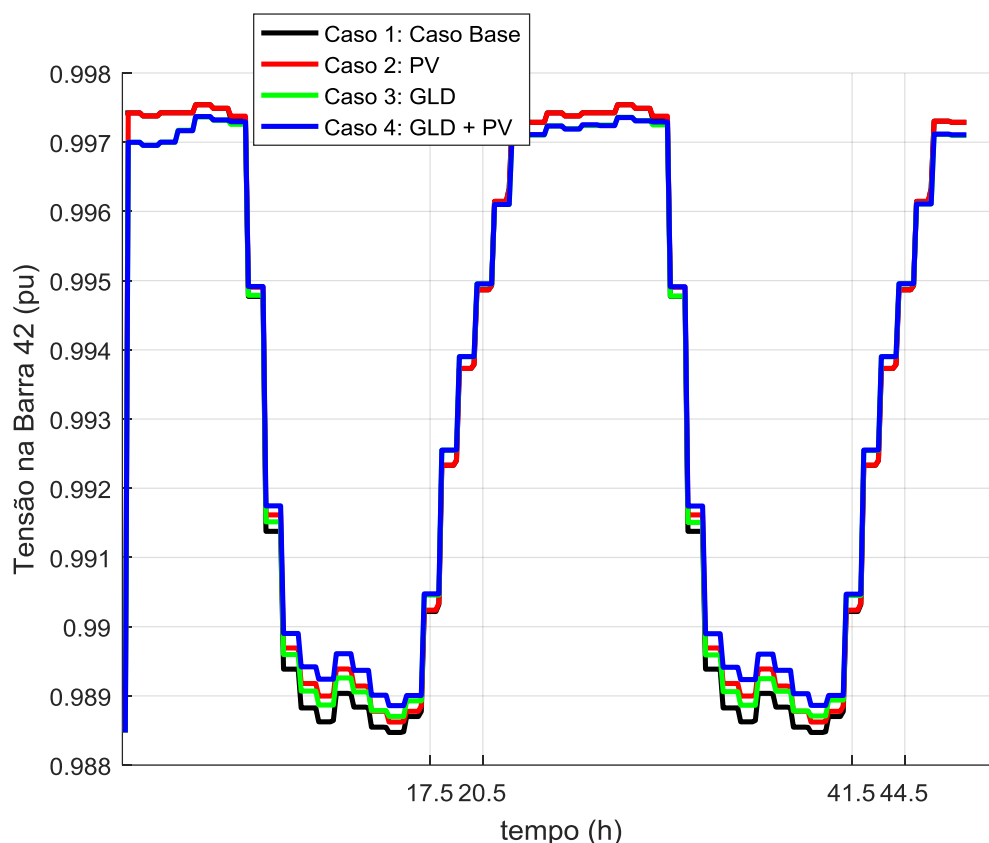


Figura 6.36 – Variação horária da tensão na barra 42 para todos os casos. Fonte: Autor.

No que diz respeito às perdas, as Figuras 6.37 e 6.38 mostram que o sistema global apresentou o mesmo perfil de perdas ativas e reativas, porém, na barra 42 isso não se repetiu já que no caso 2 somente ocorre compensação de potência ativa e o consumo de potência reativa permanece o mesmo do caso 1, no caso 3 a demanda de potência reativa tem o mesmo perfil da demanda de potência ativa e no caso 4 a demanda de potência reativa é semelhante à demanda do caso 3 mesmo havendo uma grande diferença na potência ativa consumida. Porém, globalmente, não há grandes mudanças nas perdas totais da rede principal.

A Figura 6.39 mostra o perfil de tensão da rede principal para o cenário de carga pesada. Assim como na Figura 6.1 em nenhum caso houve violação de tensão seja por elevação ou afundamento. Seguindo a ordem crescente, a barra 42 tem a tag 113, por isso a Figura 6.40 representa um zoom dado na Figura 6.39 acima da barra 42 (tag 113). Pode-se notar que apesar da clara mudança no nível de tensão, esta não se deu de forma considerável, mas sutil.

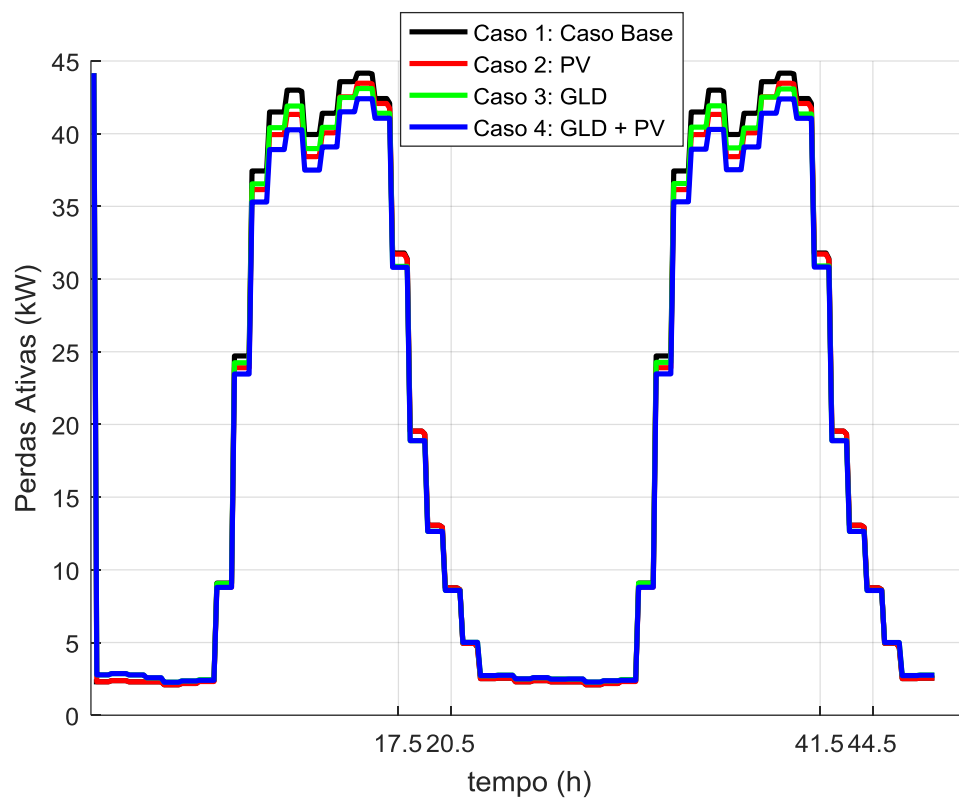


Figura 6.37 – Variação horária das perdas ativas para todos os casos. Fonte: Autor.

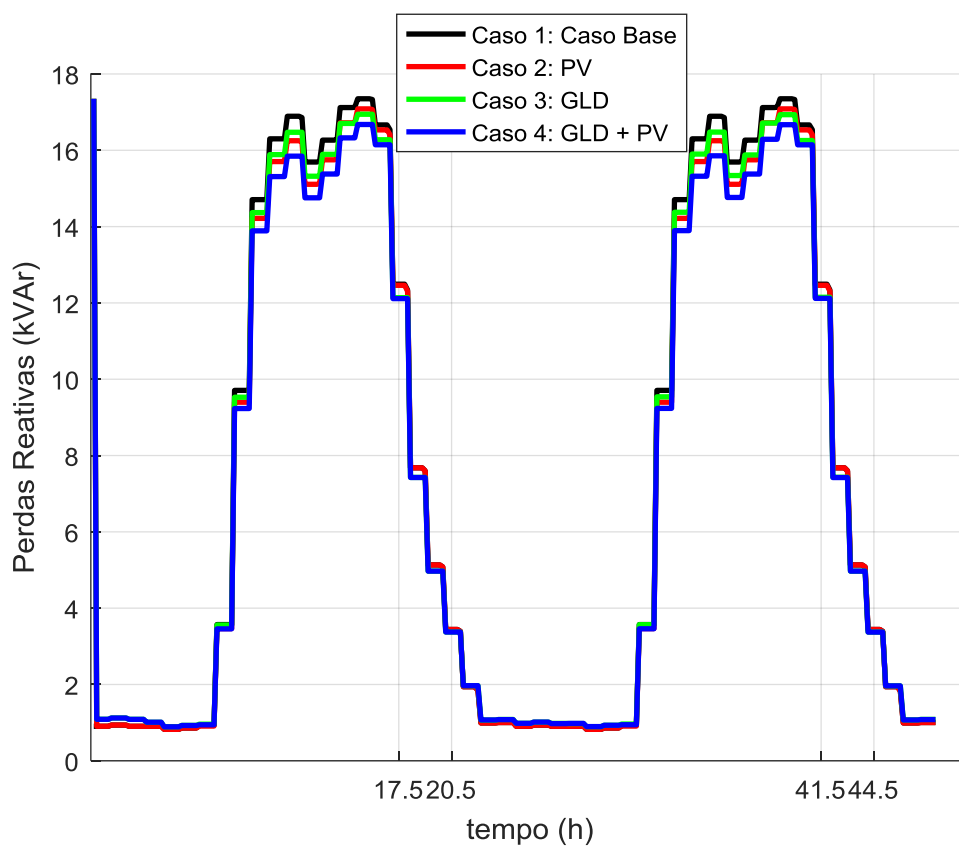


Figura 6.38 – Variação horária das perdas reativas para todos os casos. Fonte: Autor.

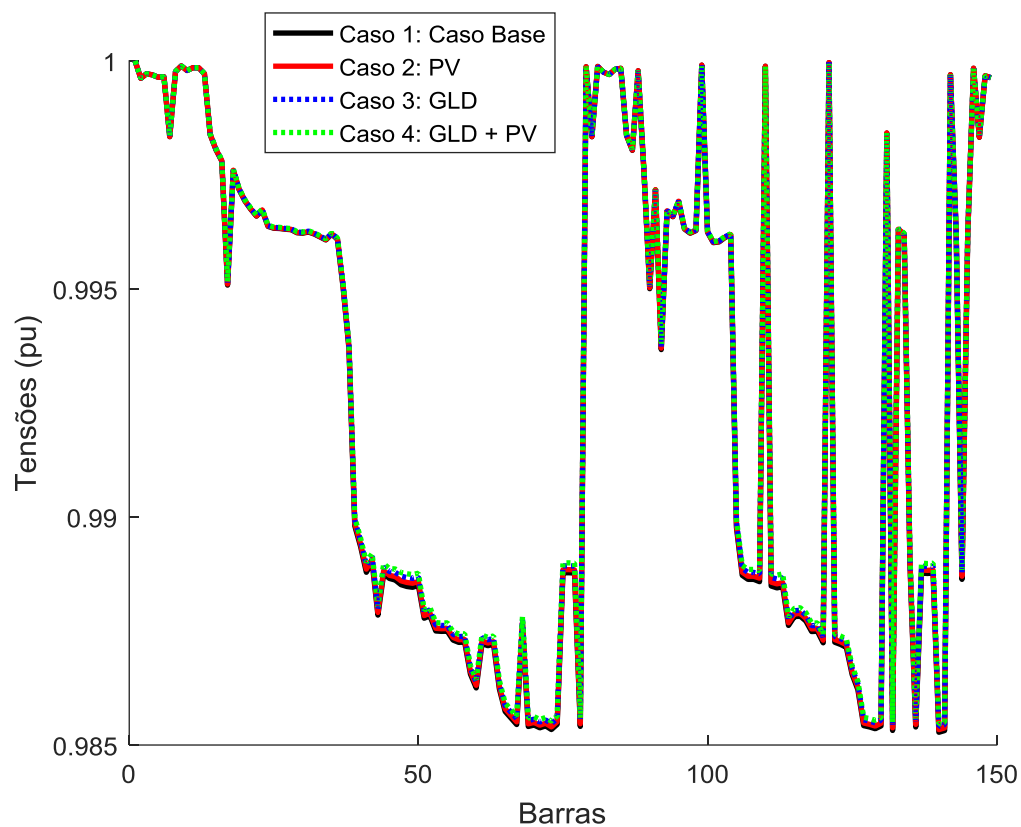


Figura 6.39 – Nível de tensão das barras da rede principal para todos os casos. Fonte: Autor.

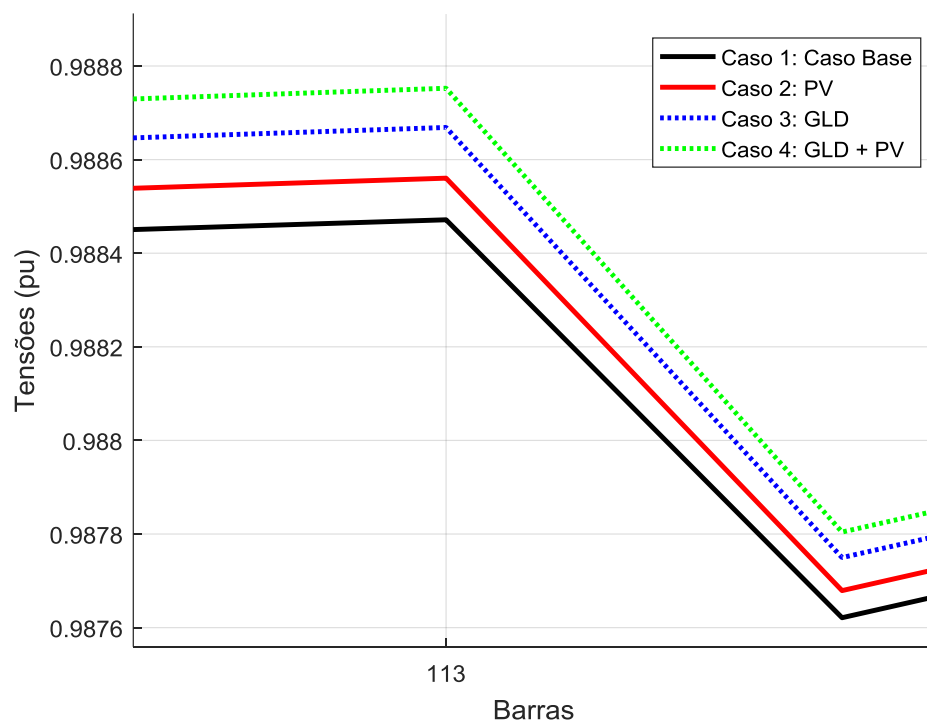


Figura 6.40 – Nível de tensão da barra 42, representada pelo número 113 na ordem crescente de barras para todos os casos. Fonte: Autor.

CAPITULO 7 – CONCLUSÃO

7.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esta dissertação apresentou um método para gerenciamento ótimo da energia pelo lado da demanda de um sistema de distribuição dotado de capacidade para armazenamento térmico a frio por meio da inercia térmica de salas de aula e geradores fotovoltaicos utilizando algoritmo genético. Ao longo do estudo o algoritmo genético está simulando o planejamento energético do controle local de uma rede elétrica inteligente. O objetivo da otimização é minimizar os custos da energia considerando tarifa verde e suavizar a curva de demanda do sistema teste considerando as restrições de potência e de temperatura das salas de aula. Utilizou-se um sistema de distribuição do campus universitário da UFPA.

Para análise dos resultados foram construídos quatro cenários:

- Caso 1 – sistema atual sem nenhum tipo de gerenciamento de carga.
- Caso 2 – sistema atual com geração fotovoltaica.
- Caso 3 – sistema com gerenciamento de demanda das cargas de refrigeração e armazenamento térmico a frio.
- Caso 4 – sistema com gerenciamento de demanda das cargas de refrigeração, armazenamento térmico a frio e geração fotovoltaica.

Dentre os principais resultados foi possível observar que a metodologia adotada reduziu consideravelmente os custos de energia em relação ao caso original (caso 1) sobretudo no caso 3 onde a redução foi de 32% e no caso 4 onde a redução foi de 45%. No caso 4 a redução é mais significativa devido ao cenário combinar duas técnicas de gerenciamento da demanda, o deslocamento de demanda e a redução de pico. Nenhum dos casos comprometeu o equilíbrio de tensão da rede e as perdas ativas e reativas da rede principal também foram reduzidas consideravelmente.

Como o caso 2 atingiu 20% de economia, a utilização do gerenciamento via deslocamento de carga se mostrou 12% mais eficiente que a utilização somente da geração fotovoltaica para redução de pico. Isto é característico de sistemas que consideram modelos tarifários variáveis como é o caso da tarifa verde, já que nos instantes de maior produtividade dos geradores fotovoltaicos o preço da tarifa é mais baixo.

No que diz respeito ao método de otimização, o AG se mostrou satisfatório para o problema de otimização do gerenciamento de cargas de refrigeração, tal qual o controle local de uma rede inteligente, pois o benefício econômico do gerenciamento se mostrou considerável sem que houvesse nenhum tipo de violação das restrições, sobretudo do conforto térmico, o que mostra que os usuários das salas de aula não serão penalizados em operações futuras.

Quanto à velocidade de resposta do AG, não se considerou como um fator importante de desempenho, pois o gerenciamento foi formulado como um problema de planejamento da operação dos dias seguintes, assim, não há necessidade de uma resposta em tempo real. Além disso, atualmente qualquer computador da nova geração consegue realizar as buscas via AG em tempo hábil para um problema de planejamento.

Por fim, se pode mostrar que a formulação via AG para problemas de gerenciamento de carga de redes de distribuição é muito eficiente para reduzir os custos de energia em curto prazo, não oferece desconforto térmico quando utilizada para o gerenciamento de cargas de refrigeração desde que a inércia térmica do ambiente seja suficiente para evitar o aumento excessivo da temperatura e quando está associado a geradores fotovoltaicos o retorno econômico é mais rápido.

7.2 TRABALHOS FUTUROS

Devido à pouca abordagem do tema, muitos trabalhos ainda podem ser desenvolvidos, como:

- O modelo matemático do sistema de armazenamento térmico pode ser melhorado com a adição da demanda térmica das pessoas que estão no ambiente controlado;
- Podem-se testar sistemas de refrigeração central em comparação ao modelo de refrigeração local com limites de temperatura variáveis de acordo com a dinâmica térmica da carga a fim de avaliar o melhor ambiente para realizar o armazenamento térmico;
- Modificar a abordagem do sistema para um problema de operação horária e dependendo de as respostas, evoluir para uma abordagem de gerenciamento em tempo real;
- Utilizar modelos para estudos dinâmicos a fim de avaliar os efeitos transitórios que o gerenciamento das cargas de refrigeração pode provocar em transformadores e demais elementos da rede de distribuição;
- Realizar estudos de impactos na qualidade de energia provocados pelo gerenciamento de cargas de refrigeração;
- Realizar estudos da operação de microrredes na rede principal do campus universitário;
- Propor soluções eletrônicas dotadas de sistemas de comunicação e informação para atuar experimentalmente nas cargas de refrigeração;
- Realizar experimentalmente o monitoramento da temperatura do ambiente externo e das paredes das salas que compõem o ambiente controlado para embasar o gerenciamento de um controle local;

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBADI, M. H.; EL-SAADANY, E. F. Demand response in electricity markets: an overview. **IEEE – Power Engineering Society General Meeting**, p. 1-5, 2007.

ALCÂNTARA, V. P.; DA SILVA, L. C. ; GERALDI,. **Energy efficiency in smart grids**. Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LA), 2013 IEEE PES Conference On. São Paulo: IEEE. 2013.

ANEEL. **Atualização das projeções de consumidores residenciais e comerciais com microgeração solar fotovoltaica no horizonte 2017-2024**. [S.l.]. 2017.

ARTECONI, A.; HEWITT, N. J.; POLONARA, F. State of the art of thermal storage for demand-side management. **Applied Energy**, p. 371-389, 2012.

BARBOSA, F. F. **Análise Computacional de Central de Água Gelada com Tanque de Termoacumulação**. Universidade de Brasília. Brasília, p. 99. 2013.

BEZERRA, H.; TOSTES, M. E. D. L. **RELATÓRIO EFICIÊNCIA ENERGÉTICA E QUALIDADE DE ENERGIA ELÉTRICA**. Belém. 2012.

CAÑIZARES, C.; PALMA-BEHNKE, R. Trends in Microgrid Control. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, p. 1905-1919, 2014.

CCEE - CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa Piloto de Resposta da Demanda**. Brasília. 2018.

CELPA. **Residencial ou Comercial**. [S.l.]. 2018.

DA COSTA, S. A. H. **OS DESAFIOS DA IMPLANTAÇÃO DA SMART GRID NO MODELO DE NEGÓCIOS DO SETOR ELÉTRICO: PROPOSTA DE CONFIGURAÇÃO DE UMA REDE**. Universidade Federal da Bahia. Salvador, p. 107. 2014.

DE MATOS, E. O. **ANÁLISE NÃO PARAMÉTRICA PARA IDENTIFICAÇÃO DE FONTES DE DISTORÇÕES HARMÔNICAS EM SISTEMAS DE ENERGIA ELÉTRICA: UM ESTUDO APLICADO NO CAMPUS UNIVERSITÁRIO DO GUAMÁ DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**. Universidade Federal do Pará. Belém, p. 131. 2016.

DINÇER, I.; ROSEN, M. A. **Thermal Energy Storage Systems and Applications**. West Sussex: John Wiley and Sons, 2011.

DOUGLASS, P. et al. Smart Demand for Frequency Regulation: Experimental Results. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, p. 1743-1720, 2013.

GELLINGS,. The Concept of Demand-Side Management for Electric Utilities. **Proceedings of the IEEE**, p. 1468-1470, 1985.

GOLDBERG, D. E. **Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning**. [S.l.]: Addison-Wesley, 1989.

GOULART, J. A. **EFEITOS DE PROGRAMAS DE RESPOSTA À DEMANDA E DA MICROGERAÇÃO NAS REDES DE DISTRIBUIÇÃO**. COPPE - UFRJ. Rio Janeiro, p. 164. 2015.

HALVGAARD, R. et al. Economic Model Predictive Control for building climate control in a Smart Grid. **Innovative Smart Grid Technologies (ISGT)**, 20 Janeiro 2012.

HAUPT, R.; HAUPT, S. E. **Practical Genetic Algorithms**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2004.

HERNÁNDEZ, T. K. **Uma Proposta de Integração da Geração Distribuída, por meio das Usinas Virtuais, ao Sistema Elétrico do Estado de São Paulo**. São Paulo, 2015.

HOLANDA, M. D. et al. **Desenvolvimento de Sistema Eficiente de Climatização com Termoacumulação para produção abaixo de 10 TR**. Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE. Gaiania: SWGE. 2012.

HUANG, B.-J. et al. Design of direct solar PV driven air conditioner. **Renewable Energy** **88**, 2016. 95-101.

IEA. **Technology Roadmap - Smart Grids**. Paris. 2011.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Pesquisa Nacional de Amostra de Domicílios 2015**. Rio de Janeiro. 2016.

JOHN, E.; HALE, ; SELVAM,. Concrete as a thermal energy storage medium for thermocline solar energy storage systems. **Solar Energy** **96**, 2013. 194-204.

KREITH, F.; BOHN, M. S. **Princípios de Transferencia de Calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos**. [S.l.]: Ciencia Moderna, 2012.

LOGENTHIRAN, ; SRINIVASAN, ; SHUN,. Demand Side Management in Smart Grid Using Heuristic Optimization. **IEEE Transactions on Smart Grid** , p. 12, 2012.

LU, A. C. **Avaliação da Tecnologia de Internet Sob Rede elétrica**. Pontifícia Universidade Católica do Paraná. Curitiba. 2010.

LUKSZO, ; VERZIJLBERGH, R. **Conceptual model of a cold storage warehouse with PV generation in a smart grid setting**. 2013 10th IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NETWORKING, SENSING AND CONTROL (ICNSC). Evry: IEEE. 2013. p. 889-894.

LUO, X. et al. Use of Adaptive Thermal Storage System as Smart Load for Voltage Control and Demand Response. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, p. 1-11, 2017.

METEOTEST. Meteororm Software - Irradiation data for every place on eath. **Meteotest**, 2016. Disponível em: <www.meteororm.com>.

MURATORI, M.; RIZZONI, G. Residential Demand Response: Dynamic Energy Management and Time-Varying Electricity Pricing. **IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS**, p. 1108-1117, 2016.

NIRO, G. **Gerenciamento de Refrigeradores para Redução do Pico de Demanda em Redes Inteligentes**. Campinas. 2011.

NOVA Economia: Gazeta do Povo. **Gazeta do Povo**, 21 Setembro 2017. Disponível em: <<http://www.gazetadopovo.com.br/economia/nova-economia/brasil-tem-apenas-59-mil-carros-eletricos-e-hibridos-6d8y6jw3gv0r4171eao3izdmw>>.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para Sistemas Fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL-CRESEB, 2014.

PROCEL. **Pesquisa de posse de equipamentos e hábitos de uso - ano base 2005 - classe residencial**. Rio de Janeiro. 2007.

REZENDE, P. H. O. **Uma proposta de modelagem de condicionadores de ar visando a análise de pedidos de ressarcimento por danos elétricos**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 159. 2012.

RIGODANZO, J. **Instalação de Medidores Inteligentes no Brasil: Uma Análise Econômica**. Santa Maria. 2015.

RMS SISTEMAS ELETRÔNICOS. MARH 21 - 993TM. RMS. Disponível em: <<http://www.rms.ind.br/produtos/marh-21-993tm---analizador-de-energia,-harmonicas-e-oscilografia-de%C2%A0perturbacoes---ip65/9>>.

SALEH, et al. Impact of Demand Side Response on a Commercial Retail Refrigeration System. **Energies**, p. 1-18, 2018.

SGIP. **Introduction to NISTIR 7628 Guidelines for Smart Grid Cyber Security**. [S.l.]. 2010.

SIEBERT, L. C. et al. **Gerenciamento pelo Lado da Demanda em Redes Inteligentes Utilizando Algoritmos Genéticos**. IV Simpósio Brasileiro de Sistemas Elétricos - SBSE. Goiânia: SWGE. 2012. p. 1-6.

SILVA, A. E. P. D. S. **Optimal Allocation and Sizing of Photovoltaic**. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Porto, p. 118. 2013.

TECUMSEH. Manuais da Empresa Tecumseh do Brasil. **Tecumseh**, 6 nov. 2017. Disponível em: <www.tecumseh.com.br>.

VANTHOURNOUT, K. et al. A Smart Domestic Hot Water Buffer. **IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID**, p. 2121-2127, 2012.

VERBEKE, S.; AUDENAERT,. Thermal inertia in buildings: A review of impacts across climate and building use. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, p. 2300-2318, 2018.

VERZIILBERGH, A.; LUKSZO, Z. **Conceptual model of a cold storage warehouse with PV generation in a smart grid setting**. Networking, Sensing and Control (ICNSC), 2013 10th IEEE International Conference on. Evry: IEEE. 2013. p. 6.

VIDAL, A.; BATISTA, L. **OTIMIZAÇÃO EVOLUTIVA DO GERENCIAMENTO PELO LADO DA DEMANDA**. Anais do XX Congresso Brasileiro de Automática. Belo Horizonte: [s.n.]. 2014. p. 3267-3274.

VILLANUEVA,. **Departamento de Engenharia Elétrica: Corpo Docente**. [S.l.]. 2016.

WANG, et al. **Demand Response Through Smart Home Energy Management Using Thermal Inertia**. Australasian Universities Power Engineering Conference, AUPEC 2013. Hobart: AUPEC. 2013.

XU, G. et al. Toward Integrating Distributed Energy Resources and Storage Devices in Smart Grid. **IEEE INTERNET OF THINGS JOURNAL**, p. 192-204, 2017.

ANEXOS

ANEXO 1 – DESCRIÇÃO DOS ALIMENTADORES DO SISTEMA TESTE

Tabela A1: Descrição dos Alimentadores. Fonte: (DE MATOS, 2016)

Alimentador	Comprimento	Localização	Nº de unidades atendidas	Potência (KVA)
AL-01	1.682,56 m	Campus Básico 1	30	5.587,50
AL-02	1.269,19 m	Campus Básico 2 (Reitoria)	13	3.775
AL-03	2.055 m	Campus Profissional	26	5.950
AL-04	2.959,53 m	Campus Saúde	15	3.012,50

ANEXO 2 – DADOS AMBIENTAIS PARA GERAÇÃO FOTOVOLTAICA

Tabela A2: Histórico da Temperatura de Belém. Fonte: (METEOTEST, 2016)

	Temperatura (°C)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
00:00:00	25,94	25,7	26,06	25,74	26,04	25,38	25,7	25,28	25,5	25,96	26,06	26,33
01:00:00	25,62	25,67	26,08	25,79	25,67	25,74	25,28	25,02	25,21	25,74	26,18	26,13
02:00:00	25,45	25,55	25,79	25,7	25,96	25,43	24,87	24,65	24,99	25,36	26,13	25,67
03:00:00	25,55	25,57	25,6	25,53	25,77	25,65	24,9	24,41	24,73	24,97	25,84	25,45
04:00:00	25,43	25,53	25,55	25,62	25,48	25,36	24,9	24,22	24,51	24,92	25,43	25,6
05:00:00	25,55	25,84	26,84	27,23	27,26	25,21	25,09	24,32	24,46	24,51	25,33	25,43
06:00:00	27,68	28,02	28,69	28,99	28,72	25,65	25,11	25,36	25,45	26,04	26,62	27,28
07:00:00	29,24	29,66	30,24	30,7	30,29	26,67	26,65	26,89	27,48	28,49	28,64	29,09
08:00:00	31,2	30,92	31,61	31,97	31,54	28,67	28,25	28,59	29,51	30,04	30,42	30,6
09:00:00	32,59	32,18	32,38	32,54	32,48	29,89	29,64	30,04	30,9	31,71	31,89	31,87
10:00:00	32,43	32,77	33,39	32,92	33,13	31,15	30,98	31,08	31,82	32,85	33,08	32,95
11:00:00	33,05	33,68	33,68	34,47	34,36	32,05	31,48	31,71	33,05	33,97	34,41	33,68
12:00:00	34,18	34,68	34,26	34,36	34,76	32,36	32,05	32,3	34,26	34,97	35,74	34,57
13:00:00	34,73	34,89	34,18	35,61	35,93	32,87	32,46	33,97	35,08	35,08	35,74	35,42
14:00:00	34,78	34,76	33,39	34,6	35,88	33,16	33	33,63	35,72	34,84	35,98	36,12
15:00:00	33,99	32,82	32,46	32,79	34,89	33,13	32,95	33,31	35,64	35,82	35,26	35,74
16:00:00	32,33	31,41	32,23	31	32,07	33,16	32,77	32,82	34,7	33,78	34,07	33
17:00:00	32,05	29,59	29,92	28,15	30,04	31,43	32,36	32,2	33,11	32,46	32,59	31,56
18:00:00	29,44	27,95	28,37	27,48	28,89	29,44	29,97	30,39	30,24	30,55	30,67	29,79
19:00:00	27,87	27,14	27,85	27,01	28,62	28,82	28	29,26	29,34	29,54	29,34	28,94
20:00:00	27,51	26,89	27,31	26,79	27,95	27,43	27,41	27,92	28,05	28,12	28,57	28,27
21:00:00	26,77	26,38	27,06	26,74	26,99	26,65	26,89	26,99	27,09	27,38	27,68	27,53
22:00:00	26,43	26,18	26,77	26,16	26,11	25,91	26,6	26,21	26,4	26,57	26,96	27,21
23:00:00	26,23	26,04	26,4	25,94	26,23	25,67	26,06	25,65	25,79	26,16	26,55	26,57

Tabela A3: Histórico da Irradiância de Belém. Fonte: (METEOTEST, 2016)

	Irradiância (kW/m2)											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
00:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
01:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
02:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
03:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
04:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
05:00:00	2,4	6,7	11,8	24,2	23,3	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
06:00:00	37,9	100,4	134,1	154,7	131,7	28,4	20,5	24,5	30,9	52,0	57,4	33,1
07:00:00	185,4	274,8	315,8	377,0	395,6	92,7	113,5	158,1	198,7	254,5	247,1	188,6
08:00:00	372,0	440,9	465,7	541,5	564,8	359,8	331,6	342,1	439,8	455,6	452,3	398,1
09:00:00	507,7	609,5	579,5	684,2	704,0	505,0	462,1	492,2	579,0	578,9	577,5	557,5
10:00:00	622,9	678,0	672,9	752,4	817,9	615,2	608,3	639,4	696,9	695,8	751,9	690,6
11:00:00	690,1	704,3	686,0	739,5	820,3	641,4	711,5	753,5	756,3	695,8	777,5	799,0
12:00:00	725,8	603,5	520,9	571,9	685,9	694,5	690,6	755,3	821,6	711,7	735,2	754,8
13:00:00	561,1	462,2	354,2	386,4	495,8	623,2	660,3	718,1	733,0	657,7	679,8	652,6
14:00:00	391,6	242,3	214,7	265,0	270,8	475,7	514,2	565,6	597,6	538,2	576,0	499,3
15:00:00	249,8	125,7	138,7	109,7	98,3	289,4	366,2	405,8	389,9	362,9	400,7	341,3
16:00:00	121,9	46,0	51,8	32,1	18,2	166,2	171,6	215,7	208,0	197,0	200,7	179,4
17:00:00	35,0	3,5	2,0	0,9	0,7	47,1	63,2	69,4	49,2	39,6	42,1	49,3
18:00:00	2,0	0,7	0,7	0,7	0,7	2,3	2,6	2,8	0,7	0,7	0,7	1,2
19:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
20:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
21:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
22:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7
23:00:00	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	1,0	1,0	1,0	0,7	0,7	0,7	0,7

ANEXO 3 – DADOS DO SISTEMA TESTE

Tabela A4: Parâmetros das linhas. Fonte: (SILVA, 2013)

Barra de Origem	Barra de Destino	Potência Base (MW)	N1/N2	R (pu)	X(pu)	B(pu)
1	88	100	0	0,0418	0,0273	0
88	3	100	0	0,06	0,01	0
57	56	100	0	0,0529	0,0061	0
56	53	100	0	0,0171	0	0
53	55	100	0	0,0237	0,0154	0
54	53	100	0	0,0133	0	0
53	68	100	0	0,0101	0	0
1	110	100	0	0,0366	0,0239	0
68	43	100	0	0,017	0	0
43	52	100	0	0,0307	0,02	0
43	51	100	0	0,0229	0,015	0
43	42	100	0	0,055	0,0359	0
45	41	100	0	0,041	0,0047	0
46	41	100	0	0,0408	0,0047	0
47	46	100	0	0,0374	0,0043	0
50	47	100	0	0,0209	0,0024	0
48	47	100	0	0,0197	0,0023	0
49	48	100	0	0,0245	0,0028	0
78	67	100	0	0,0459	0,0299	0
41	77	100	0	0,0287	0,0033	0
41	76	100	0	0,0269	0,0031	0
41	44	100	0	0,021	0,0024	0
41	75	100	0	0,0319	0,0037	0
41	40	100	0	0,0556	0,0064	0
42	40	100	0	0,0147	0,0096	0
72	67	100	0	0,1715	0,1119	0
40	39	100	0	0,0153	0,0018	0
67	66	100	0	0,0197	0,0129	0
74	66	100	0	0,0478	0,0312	0
39	38	100	0	0,1047	0,0683	0
1	121	100	0	0,0079	0,0052	0
121	9	100	0	0,0183	0,0119	0
121	12	100	0	0,1382	0,0591	0
88	4	100	0	0,03	0	0
9	11	100	0	0,0282	0,0024	0
9	10	100	0	0,0498	0,0213	0
10	8	100	0	0,0269	0,0115	0
10	13	100	0	0,052	0,0339	0
1	131	100	0	0,0259	0,0169	0

131	7	100	0	0,082	0	0
131	14	100	0	0,0268	0,0175	0
131	15	100	0	0,0078	0	0
28	29	100	0	0,0628	0,0053	0
24	25	100	0	0,0135	0,0015	0
25	26	100	0	0,0098	0,0011	0
25	27	100	0	0,0091	0,001	0
27	31	100	0	0,0348	0,004	0
33	36	100	0	0,0205	0,0023	0
31	35	100	0	0,035	0,004	0
4	6	100	0	0,02	0	0
22	24	100	0	0,019	0,0022	0
21	22	100	0	0,0122	0,0014	0
21	23	100	0	0,0231	0,0027	0
20	21	100	0	0,0132	0,0015	0
30	33	100	0	0,0263	0,003	0
19	20	100	0	0,0173	0,002	0
18	19	100	0	0,0276	0,0032	0
16	18	100	0	0,0132	0,0015	0
16	17	100	0	0,084	0,0096	0
17	37	100	0	0,0743	0,0085	0
17	38	100	0	0,0399	0,017	0
6	5	100	0	0,02	0	0
30	34	100	0	0,0615	0,0068	0
30	32	100	0	0,0146	0,0095	0
24	30	100	0	0,0183	0,0119	0
24	28	100	0	0,0292	0,0125	0
15	16	100	0	0,0053	0	0
70	74	100	0	0,0177	0,0116	0
69	74	100	0	0,0235	0,0153	0
71	69	100	0	0,0215	0,0141	0
66	65	100	0	0,0169	0,0019	0
65	60	100	0	0,0605	0,0069	0
64	60	100	0	0,0553	0,0047	0
60	59	100	0	0,0342	0,0039	0
1	99	100	0	0,0532	0,0347	0
59	56	100	0	0,0806	0,0092	0
58	56	100	0	0,022	0,0025	0
62	61	100	0	0,027	0,0176	0
63	61	100	0	0,0529	0,0345	0
61	58	100	0	0,0167	0,0019	0
73	67	100	0	0,021	0,0024	0
110	81	100	110,2362	0	0,045	0
12	85	100	110,2362	0	0,045	0
11	84	100	110,2362	0	0,06	0

8	82	100	110,2362	0	0,045	0
13	83	100	110,2362	0	0,045	0
18	89	100	110,2362	0	0,045	0
15	87	100	110,2362	0	0,045	0
14	86	100	110,2362	0	0,045	0
7	147	100	110,2362	0	0,06	0
22	94	100	110,2362	0	0,045	0
23	93	100	110,2362	0	0,045	0
3	142	100	110,2362	0	0,045	0
19	91	100	110,2362	0	0,045	0
20	95	100	110,2362	0	0,045	0
29	145	100	110,2362	0	0,045	0
28	98	100	110,2362	0	0,045	0
32	104	100	110,2362	0	0,045	0
36	102	100	110,2362	0	0,06	0
33	103	100	110,2362	0	0,045	0
26	96	100	110,2362	0	0,045	0
29	97	100	110,2362	0	0,045	0
31	100	100	110,2362	0	0,045	0
4	148	100	110,2362	0	0,045	0
27	133	100	110,2362	0	0,045	0
34	101	100	110,2362	0	0,06	0
35	134	100	110,2362	0	0,045	0
35	143	100	110,2362	0	0,045	0
37	90	100	110,2362	0	0,045	0
38	92	100	110,2362	0	0,045	0
39	105	100	110,2362	0	0,06	0
44	106	100	110,2362	0	0,06	0
77	138	100	110,2362	0	0,045	0
75	139	100	110,2362	0	0,045	0
6	2	100	110,2362	0	0,06	0
76	137	100	110,2362	0	0,045	0
46	109	100	110,2362	0	0,06	0
50	111	100	110,2362	0	0,045	0
48	113	100	110,2362	0	0,045	0
49	112	100	110,2362	0	0,045	0
45	108	100	110,2362	0	0,045	0
45	107	100	110,2362	0	0,045	0
45	144	100	110,2362	0	0,045	0
42	135	100	110,2362	0	0,06	0
52	116	100	110,2362	0	0,045	0
5	149	100	110,2362	0	0,045	0
51	117	100	110,2362	0	0,06	0
43	115	100	110,2362	0	0,06	0
68	114	100	110,2362	0	0,045	0

54	118	100	110,2362	0	0,045	0
55	119	100	110,2362	0	0,045	0
57	120	100	110,2362	0	0,06	0
59	125	100	110,2362	0	0,045	0
64	126	100	110,2362	0	0,06	0
58	122	100	110,2362	0	0,06	0
62	124	100	110,2362	0	0,06	0
99	79	100	110,2362	0	0,06	0
63	123	100	110,2362	0	0,045	0
69	128	100	110,2362	0	0,045	0
70	127	100	110,2362	0	0,045	0
78	136	100	110,2362	0	0,045	0
73	141	100	110,2362	0	0,06	0
72	130	100	110,2362	0	0,045	0
71	129	100	110,2362	0	0,045	0
73	140	100	110,2362	0	0,06	0
73	132	100	110,2362	0	0,045	0
110	146	100	110,2362	0	0,045	0
110	146	100	110,2362	0	0,045	0
7	80	100	110,2362	0	0,06	0

Tabela A5: Parâmetros das barras de carga. Fonte: (SILVA, 2013)

Nº da Barra	Potência Base (MW)	Tensão Base (kV)	Pc (pu)	Qc (pu)	Vmax (pu)	Vmin (pu)
142	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
148	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
84	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
85	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
106	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
80	100	0,127	0,000125	0,000031	1,05	0,95
147	100	0,127	0,00085	0,00023	1,05	0,95
86	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
102	100	0,127	0,0023	0,00098	1,05	0,95
103	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
89	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
95	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
2	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
91	100	0,127	0,000769	0,000166	1,05	0,95
94	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
93	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
96	100	0,127	0,000518	0,00022	1,05	0,95

133	100	0,127	0,000708	0,000136	1,05	0,95
100	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
92	100	0,127	0,000529	0,000284	1,05	0,95
104	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
97	100	0,127	0,000518	0,00022	1,05	0,95
145	100	0,127	0,000518	0,00022	1,05	0,95
149	100	0,127	0,00063	0,000214	1,05	0,95
98	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
101	100	0,127	0,0023	0,00098	1,05	0,95
143	100	0,127	0,000461	0,000076	1,05	0,95
134	100	0,127	0,000855	0,00017	1,05	0,95
90	100	0,127	0,00092	0,000192	1,05	0,95
122	100	0,127	0,000237	0,000043	1,05	0,95
124	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
123	100	0,127	0,0003	0,000061	1,05	0,95
128	100	0,127	0,000518	0,00022	1,05	0,95
127	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
79	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
120	100	0,127	0,000924	0,000157	1,05	0,95
119	100	0,127	0,000193	0,000037	1,05	0,95
118	100	0,127	0,000677	0,000083	1,05	0,95
115	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
117	100	0,127	0,0023	0,00098	1,05	0,95
116	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
114	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
136	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
135	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
144	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
81	100	0,127	0,000243	0,000106	1,05	0,95
107	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
108	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
109	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
111	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
113	100	0,127	0,001216	0,000106	1,05	0,95
112	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
137	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
138	100	0,127	0,000518	0,00022	1,05	0,95
132	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
139	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
146	100	0,127	0,000802	0,00018	1,05	0,95
125	100	0,127	0,000345	0,000147	1,05	0,95
105	100	0,127	0,00138	0,000588	1,05	0,95
140	100	0,127	0,0023	0,00098	1,05	0,95
141	100	0,127	0,001624	0,000363	1,05	0,95
130	100	0,127	0,000141	0,000041	1,05	0,95

129	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
126	100	0,127	0,000332	0,000316	1,05	0,95
87	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95
146	100	0,127	0,0008	0,0018	1,05	0,95
83	100	0,127	0,001035	0,000441	1,05	0,95
82	100	0,127	0,00069	0,000294	1,05	0,95

Tabela A6: Resultado do fluxo de carga para o caso base – carga pesada. Fonte: Autor.

Bus	V (pu)	Phase (rad)	P gen (pu)	Q gen (pu)	P load (pu)	Q load (pu)
1	1	0	0,060068	0,024686	0	0
10	0,999617	-7E-05	0	0	0,00138	0,000588
1000	0,999717	-2,5E-05	0	0	0	0
1001	0,999692	-3,7E-06	0	0	0	0
1002	0,999639	1,66E-05	0	0	0	0
1003	0,999652	1,24E-05	0	0	0	0
1004	0,998336	-0,00032	0	0	0	0
1005	0,999765	-2E-05	0	0	0	0
1006	0,999889	-2E-05	0	0	0	0
1007	0,999787	-2E-05	0	0	0	0
1008	0,999849	-6,4E-06	0	0	0	0
1009	0,999849	-7,1E-06	0	0	0	0
1010	0,999719	-3,2E-05	0	0	0	0
1011	0,99838	-0,00035	0	0	0	0
1012	0,998049	-0,0002	0	0	0	0
1013	0,997804	-0,00011	0	0	0	0
1014	0,995082	0,000594	0	0	0	0
1015	0,997595	-5,5E-05	0	0	0	0
1016	0,997176	5,2E-05	0	0	0	0
1017	0,996928	0,000118	0	0	0	0
1018	0,996748	0,000165	0	0	0	0
1019	0,996594	0,000205	0	0	0	0
1020	0,996722	0,000173	0	0	0	0
1021	0,99637	0,000263	0	0	0	0
1022	0,996329	0,000269	0	0	0	0
1023	0,996324	0,00027	0	0	0	0
1024	0,996307	0,000271	0	0	0	0
1025	0,996298	0,000263	0	0	0	0
1026	0,99623	0,000285	0	0	0	0
1027	0,996221	0,000237	0	0	0	0
1028	0,996248	0,000278	0	0	0	0
1029	0,996202	0,000233	0	0	0	0
1030	0,996138	0,000262	0	0	0	0
1031	0,996073	0,000282	0	0	0	0

1032	0,9962	0,000282	0	0	0	0
1033	0,996089	0,000276	0	0	0	0
1034	0,995012	0,0006	0	0	0	0
1035	0,993682	0,000549	0	0	0	0
1036	0,989805	-0,00029	0	0	0	0
1037	0,989354	-0,00017	0	0	0	0
1038	0,988786	-2,2E-05	0	0	0	0
1039	0,989016	-0,00024	0	0	0	0
1040	0,987848	-0,0005	0	0	0	0
1041	0,988756	-1,3E-05	0	0	0	0
1042	0,988651	1,83E-05	0	0	0	0
1043	0,988616	1,22E-05	0	0	0	0
1044	0,988515	2,73E-05	0	0	0	0
1045	0,988476	3,09E-05	0	0	0	0
1046	0,988458	3,63E-05	0	0	0	0
1047	0,9885	3,19E-05	0	0	0	0
1048	0,98778	-0,00052	0	0	0	0
1049	0,987834	-0,00051	0	0	0	0
1050	0,9875	-0,00038	0	0	0	0
1051	0,987491	-0,00037	0	0	0	0
1052	0,987495	-0,00038	0	0	0	0
1053	0,9873	-0,0003	0	0	0	0
1054	0,98725	-0,0003	0	0	0	0
1055	0,987256	-0,00029	0	0	0	0
1056	0,986555	-8,8E-05	0	0	0	0
1057	0,986251	-1,8E-06	0	0	0	0
1058	0,987226	-0,00028	0	0	0	0
1059	0,987178	-0,00029	0	0	0	0
1060	0,987208	-0,00029	0	0	0	0
1062	0,986231	1,45E-05	0	0	0	0
1063	0,985736	0,000133	0	0	0	0
1065	0,985592	0,00017	0	0	0	0
1066	0,985449	0,000136	0	0	0	0
1067	0,987628	-0,00042	0	0	0	0
1068	0,985406	0,000137	0	0	0	0
1069	0,985437	0,000142	0	0	0	0
1070	0,985377	0,000132	0	0	0	0
1071	0,98542	0,000127	0	0	0	0
1072	0,985339	0,000163	0	0	0	0
1073	0,985453	0,000145	0	0	0	0
1076	0,988775	-1,9E-05	0	0	0	0
1077	0,988777	-1,9E-05	0	0	0	0
1078	0,988771	-1,8E-05	0	0	0	0
1079	0,985408	0,000129	0	0	0	0
11	0,999871	-9,9E-05	0	0	0,00138	0,000588

12	0,998334	-0,00033	0	0	0,000125	0,000031
13	0,999878	2,13E-05	0	0	0,000243	0,000106
14	0,999752	-5,1E-05	0	0	0,00069	0,000294
15	0,999699	-7,9E-05	0	0	0,001035	0,000441
16	0,999814	-8,9E-05	0	0	0,00138	0,000588
17	0,999836	-3,8E-05	0	0	0,00069	0,000294
18	0,99836	-0,0004	0	0	0,001035	0,000441
19	0,998036	-0,00023	0	0	0,00069	0,000294
2	0,999783	-4,1E-05	0	0	0	0
20	0,997582	-8,6E-05	0	0	0,00069	0,000294
21	0,995004	0,000559	0	0	0,00092	0,000192
22	0,997169	1,72E-05	0	0	0,000769	0,000166
23	0,993669	0,000524	0	0	0,000529	0,000284
24	0,996703	0,000126	0	0	0,001035	0,000441
25	0,996581	0,000174	0	0	0,00069	0,000294
26	0,996914	8,64E-05	0	0	0,00069	0,000294
27	0,996314	0,000247	0	0	0,000518	0,00022
28	0,99622	0,000262	0	0	0,000518	0,00022
29	0,996278	0,000216	0	0	0,001035	0,000441
3	0,999906	-1,7E-05	0	0	0	0
30	0,996241	0,000263	0	0	0,000345	0,000147
31	0,996014	0,000143	0	0	0,0023	0,00098
32	0,99603	0,000137	0	0	0,0023	0,00098
33	0,996125	0,00023	0	0	0,00069	0,000294
34	0,996182	0,000186	0	0	0,001035	0,000441
35	0,98977	-0,00037	0	0	0,00138	0,000588
36	0,98872	-9,8E-05	0	0	0,00138	0,000588
37	0,988631	-2,9E-05	0	0	0,001035	0,000441
38	0,988631	-2,9E-05	0	0	0,001035	0,000441
39	0,988581	-7,3E-05	0	0	0,00138	0,000588
4	0,999883	3,23E-05	0	0	0	0
40	0,988486	1,14E-07	0	0	0,00069	0,000294
41	0,988445	4,49E-06	0	0	0,00069	0,000294
42	0,988471	-2,5E-05	0	0	0,001216	0,000106
43	0,987621	-0,00044	0	0	0,000345	0,000147
44	0,987812	-0,00059	0	0	0,00138	0,000588
45	0,987828	-0,00052	0	0	0,000345	0,000147
46	0,98772	-0,00066	0	0	0,0023	0,00098
47	0,987488	-0,00041	0	0	0,000677	0,000083
48	0,987494	-0,00039	0	0	0,000193	0,000037
49	0,98724	-0,00035	0	0	0,000924	0,000157
5	0,999962	-7E-06	0	0	0	0
50	0,987253	-0,0003	0	0	0,000237	0,000043
51	0,987205	-0,0003	0	0	0,0003	0,000061
52	0,987142	-0,00037	0	0	0,00138	0,000588

53	0,986548	-0,0001	0	0	0,000345	0,000147
54	0,986212	-6E-06	0	0	0,000332	0,000316
56	0,985424	0,00011	0	0	0,00069	0,000294
57	0,985396	0,000113	0	0	0,000518	0,00022
58	0,985357	8,36E-05	0	0	0,001035	0,000441
59	0,985418	0,000121	0	0	0,000141	0,000041
6	0,998416	-0,00034	0	0	0	0
60	0,985319	0,000115	0	0	0,001035	0,000441
61	0,996301	0,000239	0	0	0,000708	0,000136
62	0,996193	0,000243	0	0	0,000855	0,00017
63	0,98898	-0,00033	0	0	0,00138	0,000588
64	0,985395	9,71E-05	0	0	0,00069	0,000294
65	0,98877	-3,5E-05	0	0	0,000345	0,000147
66	0,988761	-4,1E-05	0	0	0,000518	0,00022
67	0,988768	-3,5E-05	0	0	0,000345	0,000147
68	0,985279	2,06E-05	0	0	0,0023	0,00098
69	0,985317	6,24E-05	0	0	0,001624	0,000363
7	0,999697	-7,1E-05	0	0	0,001035	0,000441
70	0,996197	0,000261	0	0	0,000461	0,000076
71	0,988631	-2,9E-05	0	0	0,001035	0,000441
72	0,99622	0,000262	0	0	0,000518	0,00022
73	0,999838	-3,8E-06	0	0	0,001602	0,00198
74	0,998322	-0,00037	0	0	0,00085	0,00023
8	0,999672	-5E-05	0	0	0,001035	0,000441
9	0,99963	-1,2E-05	0	0	0,00063	0,000214