

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA
DO RIO DE JANEIRO



Artur Cortez Bellotti de Oliveira

**Avaliação energética da implementação de um sistema de trigeração com
termoacumulação mediante um estudo de caso**

Projeto de Graduação

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da
PUC-Rio

Orientador: José Alberto dos Reis Parise
Coorientador: Felipe Portes Lanes

Rio de Janeiro
Julho de 2017

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu Orientador, José Alberto dos Reis Parise, e Coorientador, Felipe Portes Lanes, amigos, pela receptividade e ensinamentos prestados no desenvolvimento deste trabalho. Foi uma honra trabalhar ao seu lado.

Agradeço também à PUC, por possibilitar minha maturação acadêmica e profissional através de professores preocupados e engajados com o progresso de seus alunos.

Por fim, agradeço à minha família, que me acompanhou em toda esta trajetória e me auxiliou em todo momento, especialmente nos mais difíceis.

RESUMO

Avaliação energética da implementação de um sistema de trigeração com termoacumulação através de um estudo de caso

A modernidade desenvolveu fortemente a percepção que muitos recursos, tais como água e energia, estão sendo gastos ineficientemente. Portanto, novas tecnologias foram trabalhadas de forma a sanar este problema. No contexto de sistemas térmicos, esse ganho na competitividade e eficiência pode ser atingido mediante sistemas de trigeração. Diante desse contexto, o objetivo principal deste estudo é determinar os benefícios da trigeração e os mecanismos que intensificam a economia energética, tal como a termoacumulação. Este objetivo foi atingido com o estudo da trigeração com demandas de eletricidade, aquecimento e refrigeração de um hospital universitário da UNICAMP. O sistema atual, sem trigeração, foi comparado com duas novas arquiteturas, ambas com trigeração, a segunda adicionalmente apresentando termoacumulação. Esta comparação foi possível com os resultados de um código escrito em MATLAB, no qual cada arquitetura foi programada segundo um modelo matemático baseado na primeira lei da termodinâmica. Com este estudo, constatou-se que a economia gerada com a implementação destas novas arquiteturas é extremamente benéfica ao hospital, economizando 34,8%, com trigeração, e 35%, com trigeração e termoacumulação, do consumo energético total.

Palavras chaves: Trigeração; Termoacumulação; Eficiência Energética.

ABSTRACT

Energetic evaluation of the implementation of a system with trigeneration and thermal energy storage through a case study.

The modern world has strongly developed the perception that many resources, such as water and energy, are being spent inefficiently. Therefore, new technologies have been developed in order to remedy this problem. In the context of thermal systems, this gain in competitiveness and efficiency can be achieved through trigeneration systems. Given this context, the main objective of this study is to determine the benefits of trigeneration and the mechanisms that intensify the economy of energy, such as the thermal energy storage. This objective was reached through the study of trigeneration with demands of electricity, heating and refrigeration of the university hospital of the University of Campinas (UNICAMP). The current system, without trigeneration, was compared with two new architectures, both with trigeneration, the second one additionally presenting thermal energy storage. This comparison was possible through the results of a code written in MATLAB, in which each architecture was programmed according to a mathematical model based on the first law of thermodynamics. This study verified that the economy generated by the implementation of these new architectures is extremely beneficial to the hospital, saving 34.8%, with trigeneration, and 35%, with trigeneration and thermal energy storage, of the total energy consumption.

Keywords: Trigeneration; Thermal Energy Storage; EnergyEfficiency.

Sumário

1 Introdução	13
2 Panorama da Operação do Hospital Universitária UNICAMP	15
2.1 Base de Dados	15
2.2 Arquitetura Original	20
3 Trigeração	21
3.1 Segunda Arquitetura – Trigeração	22
4 Termoacumulação	25
4.1 Terceira Arquitetura – Trigeração com Termoacumulação	25
5 Modelo Matemático	28
5.1 Modelo Matemático da Primeira Arquitetura	28
5.2 Modelo Matemático da Segunda Arquitetura	30
5.3 Modelo Matemático da Terceira Arquitetura	33
5.4 Constantes	36
5.5 Ressalvas	37
6 Resultados do Código MATLAB	39
6.1 Resultados dos Primeiros Oito Conjuntos de Dados: Estações	40
6.1.1 Capacidade de Termoacumulação Fria	40
6.1.2 Uso da Termoacumulação Fria	48
6.1.3 Capacidade de Termoacumulação Quente	56
6.1.4 Uso da Termoacumulação Quente	61
6.1.5 Total de Energia Consumida	64
6.2 Resultados do Nono Conjunto de Dados: Ano Inteiro	70
6.2.1 Pré-Análise do Ano	71
6.2.2 Dimensionamento do Tanque de Termoacumulação Fria	71
6.2.3 Economia Gerada Através das Arquiteturas	75
6.2.4 Proposição da 4ª Arquitetura – Trigeração com Termoacumulação Fria	76
7 Conclusão	77

Lista de Figuras

Figura 2.1: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Verão	16
Figura 2.2: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Verão	16
Figura 2.3: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Outono	17
Figura 2.4: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Outono	17
Figura 2.5: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Inverno	18
Figura 2.6: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Inverno	18
Figura 2.7: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Primavera	19
Figura 2.8: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Primavera	19
Figura 2.9: Primeira Arquitetura – Status Quo do Hospital	20
Figura 3.1: Exemplo de Trigeração	21
Figura 3.2: Segunda Arquitetura - Trigeração	23
Figura 4.1: Terceira Arquitetura - Trigeração com Termoacumulação	26
Figura 5.1: Primeira Arquitetura – Detalhes Expostos	29
Figura 5.2: Segunda Arquitetura – Detalhes Expostos	31
Figura 5.3: Terceira Arquitetura – Detalhes Expostos	34
Figura 6.1: Capacidade de Termoacumulação Fria para Verão, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura	41
Figura 6.2: Capacidade de Termoacumulação Fria para Verão, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura	43
Figura 6.3: Capacidade de Termoacumulação Fria para Outono, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	43
Figura 6.4: Capacidade de Termoacumulação Fria para Outono, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	44
Figura 6.5: Capacidade de Termoacumulação Fria para Inverno, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	45
Figura 6.6: Capacidade de Termoacumulação Fria para Inverno, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	46
Figura 6.7: Capacidade de Termoacumulação Fria para Primavera, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	47
Figura 6.8: Capacidade de Termoacumulação Fria para Primavera, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	48

Figura 6.9: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Verão – Dias Úteis	49
Figura 6.10: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Verão – Dias Não Úteis	50
Figura 6.11: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Outono – Dias Úteis	51
Figura 6.12: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Outono – Dias Não Úteis	52
Figura 6.13: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Inverno – Dias Úteis	53
Figura 6.14: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Inverno – Dias Não Úteis	54
Figura 6.15: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura na Primavera – Dias Úteis	55
Figura 6.16: Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura na Primavera – Dias Não Úteis	56
Figura 6.17: Capacidade de Termoacumulação Quente para Verão, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	57
Figura 6.18: Capacidade de Termoacumulação Quente para Verão, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	58
Figura 6.19: Capacidade de Termoacumulação Quente para Outono, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	58
Figura 6.20: Capacidade de Termoacumulação Quente para Outono, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	59
Figura 6.21: Capacidade de Termoacumulação Quente para Inverno, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	59
Figura 6.22: Capacidade de Termoacumulação Quente para Inverno, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	60
Figura 6.23: Capacidade de Termoacumulação Quente para Primavera, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	60
Figura 6.24: Capacidade de Termoacumulação Quente para Primavera, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.	61
Figura 6.25: Uso da Termoacumulação Quente para Verão em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.	62

Figura 6.26: Uso da Termoacumulação Quente para Outono em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.	62
Figura 6.27: Uso da Termoacumulação Quente para Inverno em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.	63
Figura 6.28: Uso da Termoacumulação Quente para Primavera em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.	63
Figura 6.29: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Verão– Dias Úteis	64
Figura 6.30: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Verão– Dias Não Úteis	65
Figura 6.31: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Outono – Dias Úteis	66
Figura 6.32: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Outono – Dias Não Úteis	67
Figura 6.33: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Inverno para: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis	68
Figura 6.34: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas na Primavera – Dias Úteis	69
Figura 6.35: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas na Primavera – Dias Não Úteis	70
Figura 6.36: Termoacumulação Fria Armazenada durante o Ano, sem restrições	73
Figura 6.37: Termoacumulação Fria Armazenada durante uma semana típica de Primavera, sem restrições	74
Figura 6.38: Quarta Arquitetura – Trigerção com Termoacumulação Fria	76

Lista de Tabelas

Tabela 5.1: Valores das Constantes, 37

Tabela 6.1: Economia Gerada Através das Arquiteturas, 75

Lista de Símbolos

α_{EX}	Fração de Energia do Motor destinada à Exaustão
α_{EC}	Fração de Energia do Motor destinada ao seu Arrefecimento
α_{ELE}	Fração de Energia do Motor destinada ao Gerador de Energia Elétrica
η_{BG}	Eficiência do Boiler à Gás
η_{ELE}	Eficiência do Boiler Elétrico
η_{GE}	Eficiência do Gerador Elétrico
ϵ_{EX}	Exaustão Eficiência do trocador de calor que recupera o calor útil da
ϵ_{EC}	Arrefecimento Eficiência do trocador de calor que recupera o calor útil do
ϵ_{CD}	Condensação Eficiência do trocador de calor que recupera o calor útil da

Lista de Símbolos

$AQ(i)$	Demanda de Aquecimento em i - kWh
$BOILER(i)$	Energia a ser consumida pelo Boiler em i - kWh
$BOILER_{ELE}(i)$	Energia a ser consumida pelo Boiler Elétrico em i - kWh
$CHILLER_{ELE}(i)$	Energia a ser consumida pelo Chiller Elétrico em i - kWh
$CHILLER_{AB}(i)$	Energia a ser consumida pelo Chiller de Absorção em i - kWh
$CONDESACAO(i)$	Energia disponível através da condensação dos Chillers em i - kWh
$COMBUSTIVEL(i)$	Energia necessária ao sistema para o atendimento às demandas - kWh
COP_{CE}	COP do Chiller Elétrico
COP_{AB}	COP do Chiller de Absorção
$ELE(i)$	Demanda de Eletricidade em i - kWh
$GE(i)$	Energia a ser consumida pelo Gerador Elétrico em i - kWh
i	Instante de Tempo – h
$REF(i)$	Demanda de Refrigeração em i - kWh
$TA_{QUENTE}(i)$	Energia “Quente” a ser armazenada ou utilizada em i - kWh
$TA_{FRIA}(i)$	Energia “fria” a ser armazenada ou utilizada em i - kWh

1 Introdução

Desde a descoberta da indução eletromagnética em 1831 por Michael Faraday [1], o mundo tem trabalhado na produção de energia elétrica, criando sua primeira usina comercial em 1882. Por ser uma tecnologia recente na época, foi inicialmente desenvolvida de forma centralizada, inclusive nos casos de difícil integração à rede elétrica, como em ambientes rurais. Com o passar dos anos, a exigência pela energia elétrica se tornou cada vez maior, sendo necessária a participação do governo na estratégia de suprimento.

Apesar do ganho que a população teve com o acesso à energia centralizada, que se deu em grande parte pelos incentivos oferecidos pelos governos locais e federais, este caminho acabou por desestimular o desenvolvimento da cogeração. Isso ocorreu porque a cogeração (que compreende o reaproveitamento do calor útil produzido na geração de energia elétrica) só é possível quando aliada aos interesses energéticos locais, ou seja, é inviável que uma usina elétrica distribua sua energia térmica recuperada a locais distantes.

A partir do fluxo natural de desenvolvimento dos meios de produção de energia e constante estímulo governamental, a eficiência das usinas elétricas cresceu rapidamente até encontrar um ponto de estagnação. À medida que esta percepção de estagnação foi consolidada, os governos, em busca da melhoria contínua da eficiência energética, recorreram ao estímulo da cogeração. Isto se exemplifica com o Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA) [2], desenvolvido em 1978 na presidência de Jimmy Carter nos Estados Unidos. Uma de suas cinco medidas principais era a compra obrigatória de energia de terceiros por parte das concessionárias, quando isto beneficiasse o consumidor final através da redução na tarifa de energia. Por serem mais eficientes, usinas que cogravam naturalmente foram extremamente beneficiadas por esta medida. As concessionárias, que geralmente produziam sua própria energia de fornecimento, tiveram uma grave mudança de paradigma.

Por fim, aliada à recente conscientização internacional da necessidade da preservação de recursos e natureza como um todo, cujo primeiro marco foi a

Agenda 21 (também conhecida como Rio 21), desenvolvida pela Organização das Nações Unidas, a cogeração tem sido alavancada não só pelo benefício econômico, mas também pelo argumento moral de preservação.

Alinhado à esta perspectiva de construir uma planeta cada vez melhor em seus processos e fins, exponho neste Trabalho de Conclusão de Curso o estudo dos ganhos energéticos associados à implementação da cogeração na forma de trigeração, complementada pela termoacumulação, no Hospital da Universidade de Campinas (UNICAMP). Este trabalho só foi possível através do estudo de Denilson Boschiero do Espírito Santo [3], que forneceu a base de dados necessária às simulações desenvolvidas.

2 Panorama Atual da Operação do Hospital Universitária UNICAMP

Visando construir e detalhar melhorias para o consumo energético do hospital, primeiro é necessário entendê-lo tanto em suas demandas quanto em sua estrutura de consumo e geração, aqui denominada como arquitetura.

2.1 Base de Dados

Este trabalho de conclusão de curso se baseia no estudo do perfil energético do hospital da UNICAMP a partir de suas três demandas operacionais: elétrica, refrigeração e aquecimento.

Para tanto, utilizaremos os dados fornecidos pelo hospital, que estão categorizados por estação e se são dia útil ou não, de hora a hora. Sendo assim, teremos oito perfis distintos, sendo quatro estações (verão, outono, inverno e primavera) e dois tipos de dia (dia útil e dia não útil), cada perfil possuindo três demandas (supracitadas), totalizando vinte e quatro perfis diários de demanda.

É importante ressaltar que os perfis fornecidos são médias diárias, isto é, a demanda de refrigeração referente aos dias úteis de verão para uma determinada hora é a média aritmética da demanda de todos dias úteis de verão para aquela mesma hora. Este fato terá impacto apenas no estudo da termoacumulação, que será vista mais à frente.

No desejo de melhorar a visibilidade e compreensão das demandas operacionais fornecidas pelo hospital, detalha-se graficamente o supracitado por meio das Figuras 2.1 a 2.8. Os pontos das curvas detalham a energia (eixo vertical) necessária para atender a demanda da hora especificada (eixo horizontal).

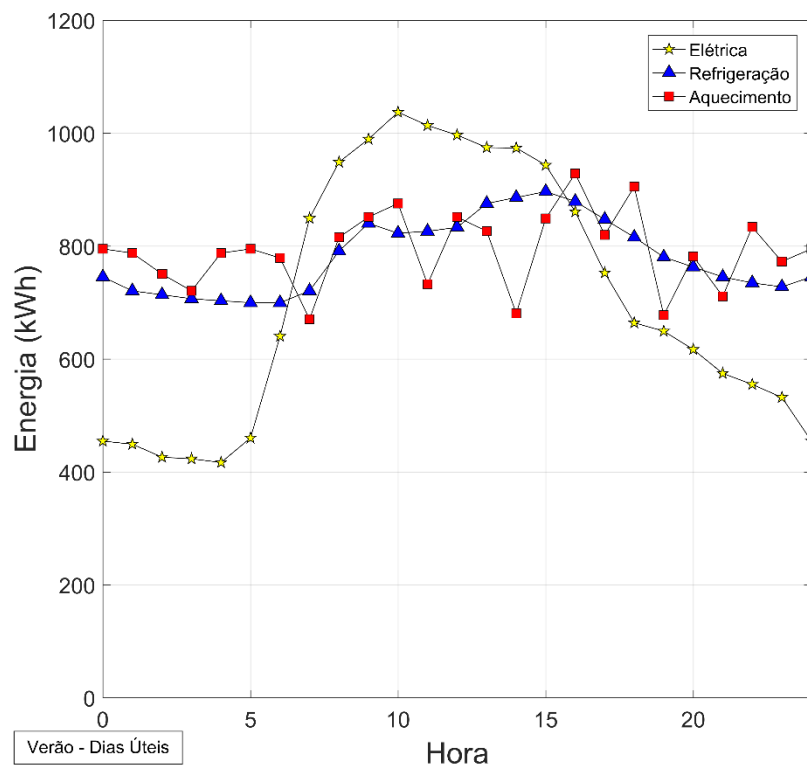


Figura 2.1: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Verão

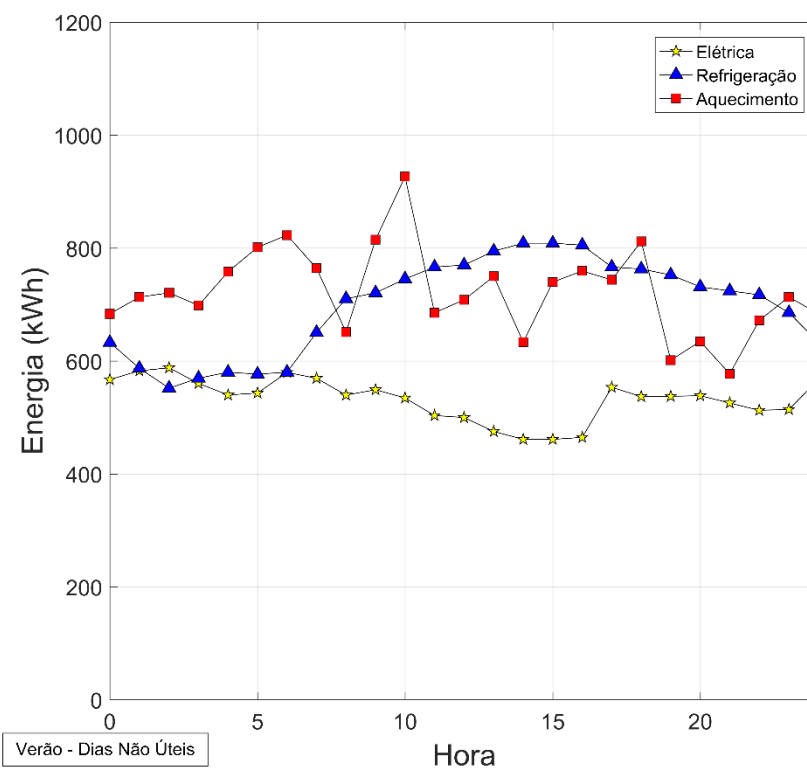


Figura 2.2: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Verão

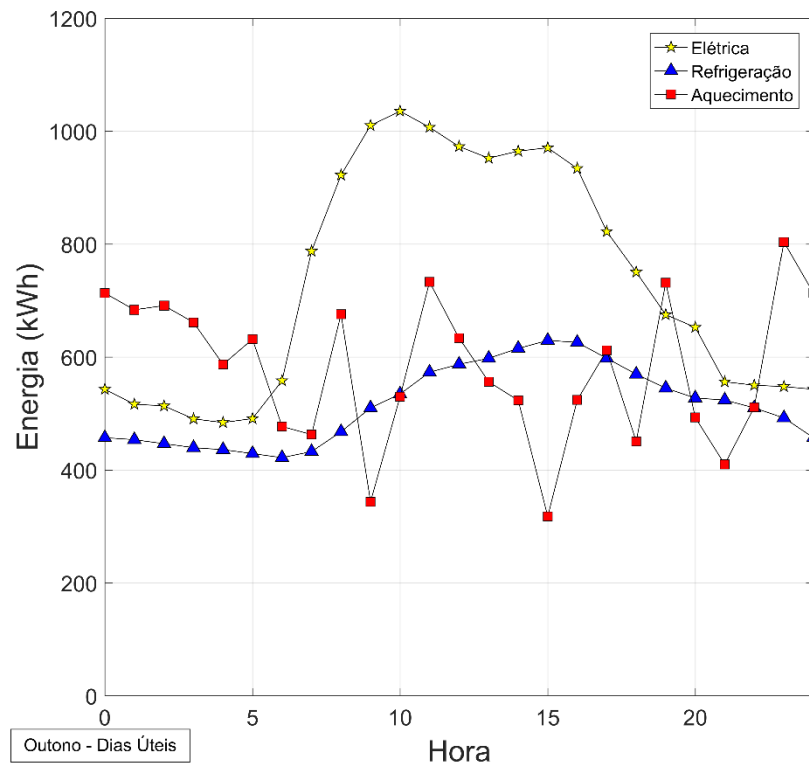


Figura 2.3: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Outono

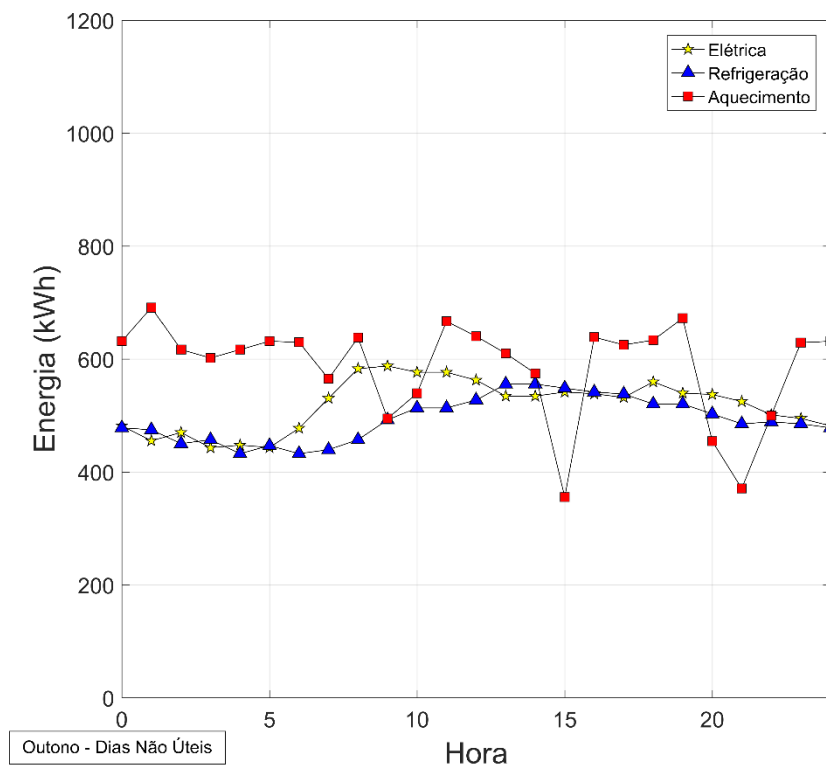


Figura 2.4: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Outono

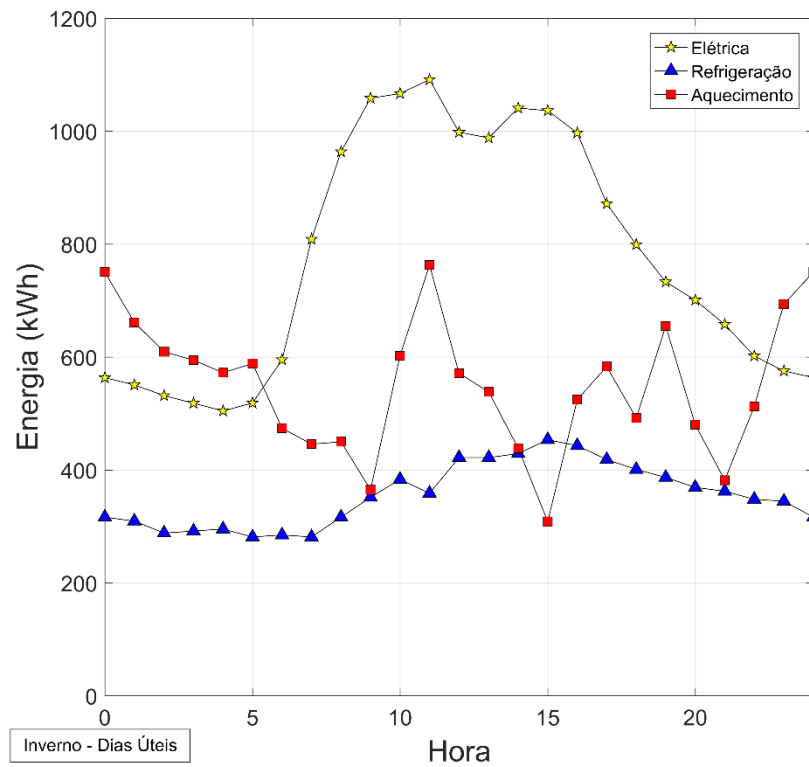


Figura 2.5: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Inverno

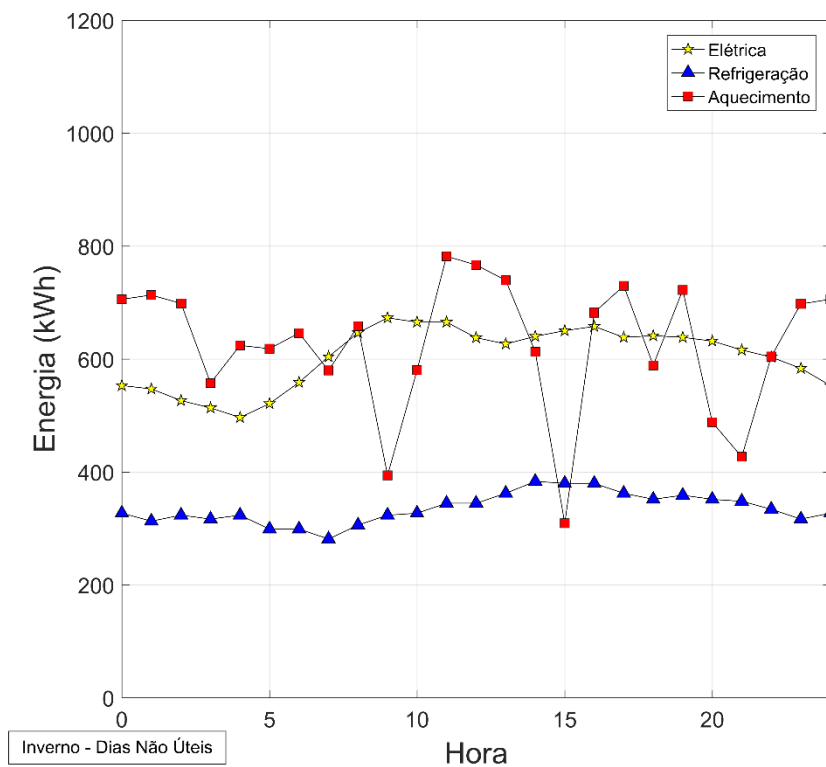


Figura 2.6: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Inverno

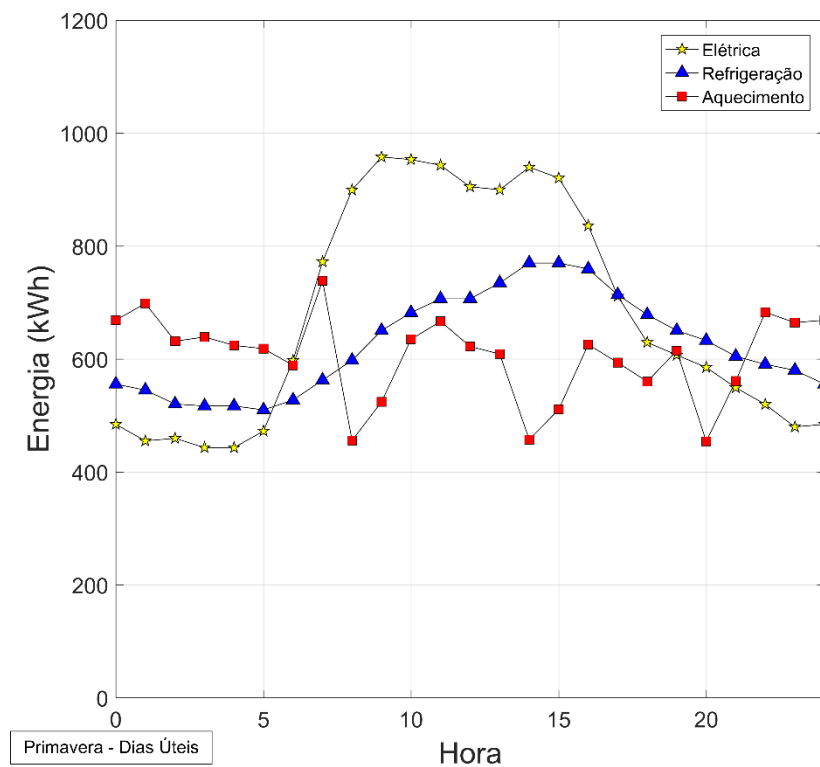


Figura 2.7: Demandas Operacionais para Dias Úteis de Primavera

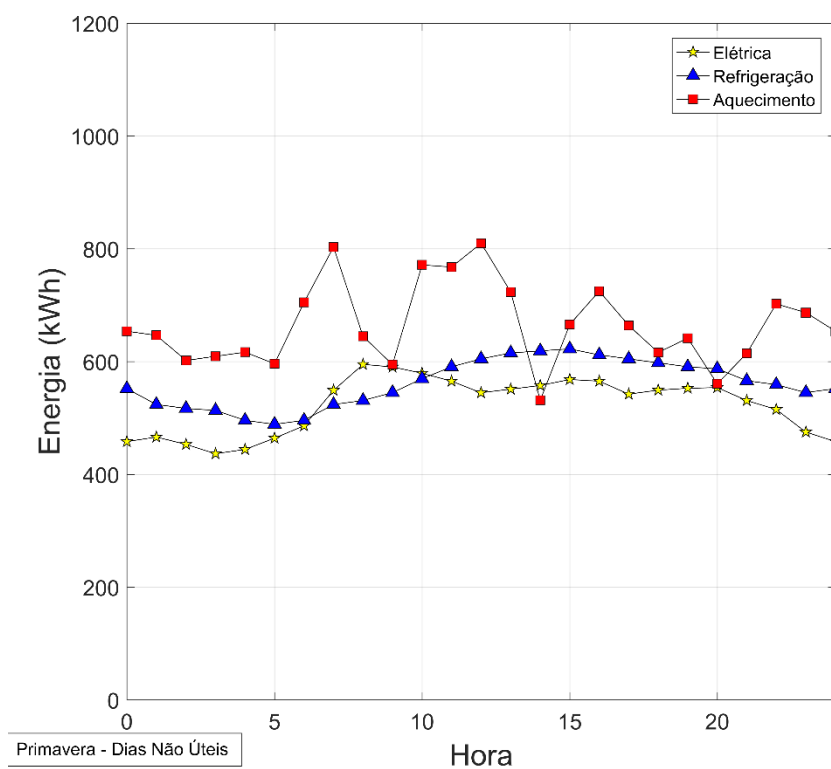


Figura 2.8: Demandas Operacionais para Dias Não Úteis de Primavera

2.2 Arquitetura Original

Estando claras as demandas do hospital, partiremos para a análise da sua arquitetura energética, demonstrada abaixo:

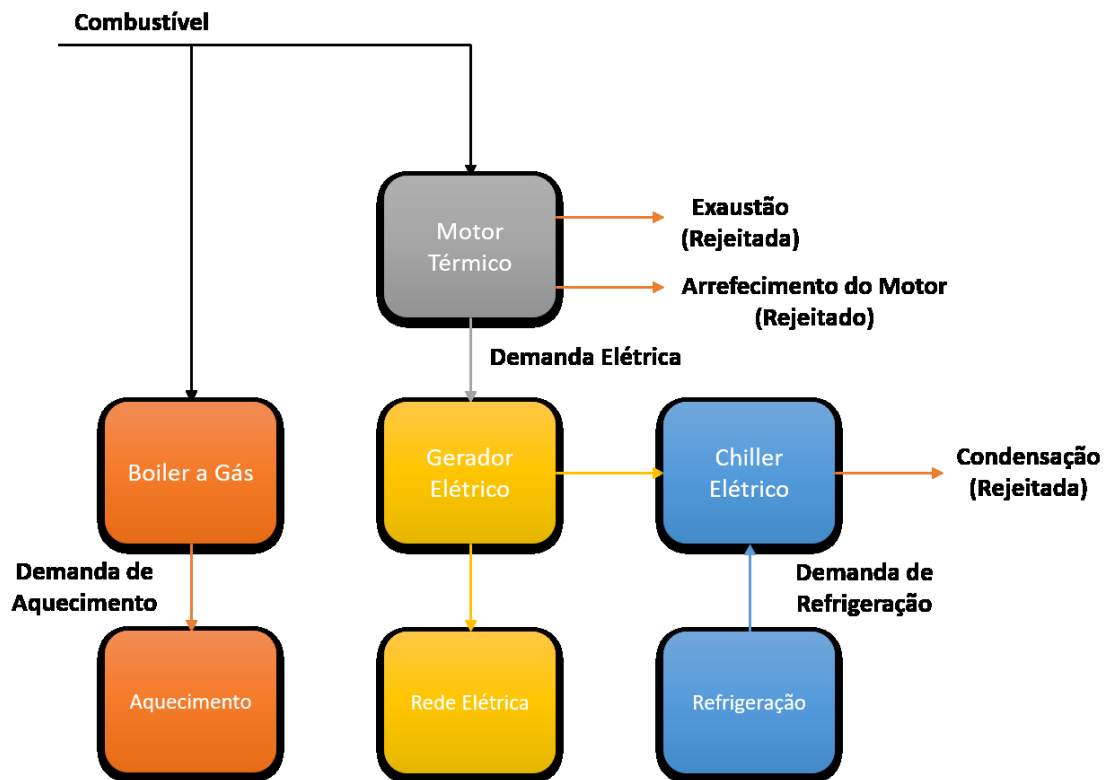


Figura 2.9: Primeira Arquitetura – Status Quo do Hospital

A Figura 2.9 acima visa embasar as possibilidades de melhoria que serão vistas à frente, portanto seu entendimento é essencial para os passos futuros. Em essência, é bastante simples: a demanda de aquecimento é atendida por um boiler a gás, a demanda de refrigeração é atendida por um chiller elétrico, que por sua vez é atendido por um gerador elétrico, que atende toda demanda elétrica.

Pelo ponto de vista energético, fica bem claro que o rejeito de qualquer energia reaproveitável é uma ineficiência, portanto futuramente serão trabalhados os desperdícios, através de uma nova arquitetura, chamada arquitetura dois.

3 Trigeração

A cogeração consiste no reaproveitamento do calor útil produzido durante a produção de energia elétrica. A trigeração é uma forma de cogeração, onde o calor útil é reaproveitado tanto para aquecimento quanto para refrigeração. Portanto, a trigeração gera três produtos: eletricidade, refrigeração e aquecimento, origem de seu nome.

Sendo assim, exemplifica-se abaixo a trigeração por meio de uma esquemática que elucida seu conceito. Em seguida, serão explicadas as mudanças resultantes da implementação da trigeração, frente à arquitetura original do hospital.

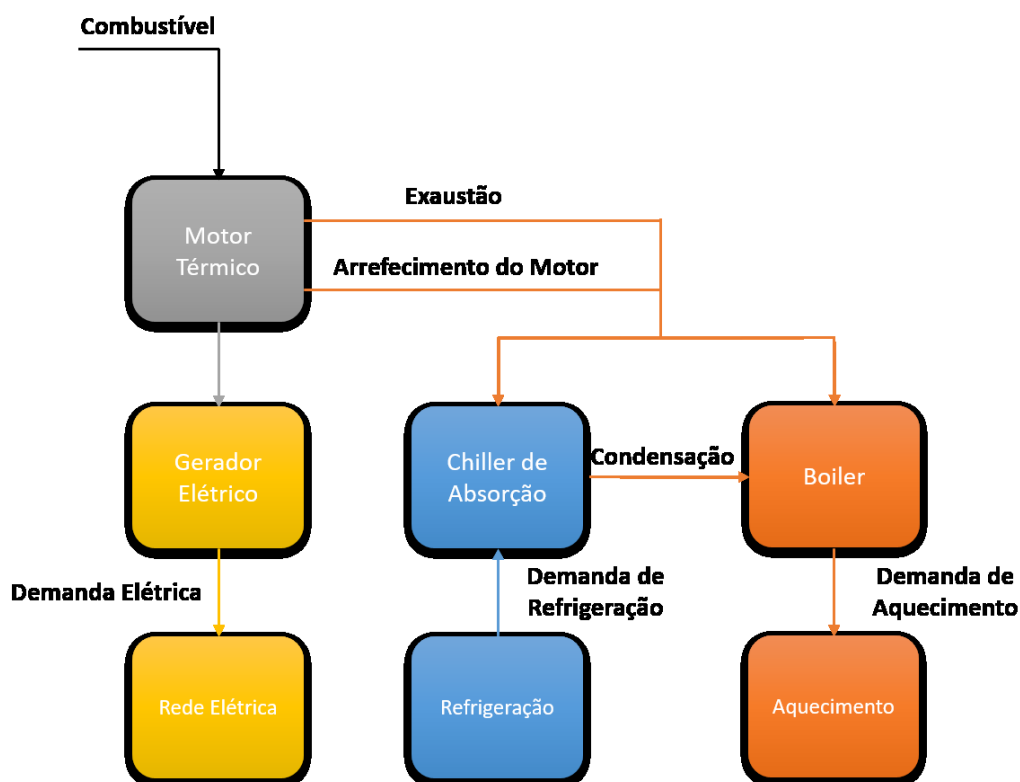


Figura 3.1: Exemplo de Trigeração

Levando em consideração as Figuras 2.9 e 3.1, destaco as diferenças entre elas:

- O calor oriundo da Exaustão e Arrefecimento do Motor, além da Condensação do Chiller, não está mais sendo rejeitados. Anteriormente rejeitado nestes processos, está sendo recuperado nos processos de refrigeração e aquecimento, caracterizando o conceito de Trigeração;
- O Chiller Elétrico da Figura 2.9 torna-se desnecessário e portanto é removido, sendo substituído por um Chiller de Absorção da Figura 3.1, capaz de aproveitar o calor supracitado;
- Adicionalmente, o Boiler a Gás da Figura 2.9 também foi removido, substituído por um Boiler da Figura 3.1 que aproveita o calor já mencionado.

3.1 Segunda Arquitetura – Trigeração

Portanto, a trigeração exemplificada acima visa gerar toda energia elétrica exigida, utilizando o calor útil rejeitado pelo motor no atendimento de suas outras demandas. Porém, algumas mudanças tornam-se necessárias na implementação prática desta trigeração, dado que nem sempre a recuperação do calor útil será suficiente para o atendimento das outras duas demandas. A segunda arquitetura, composta por estas mudanças, está exibida abaixo.

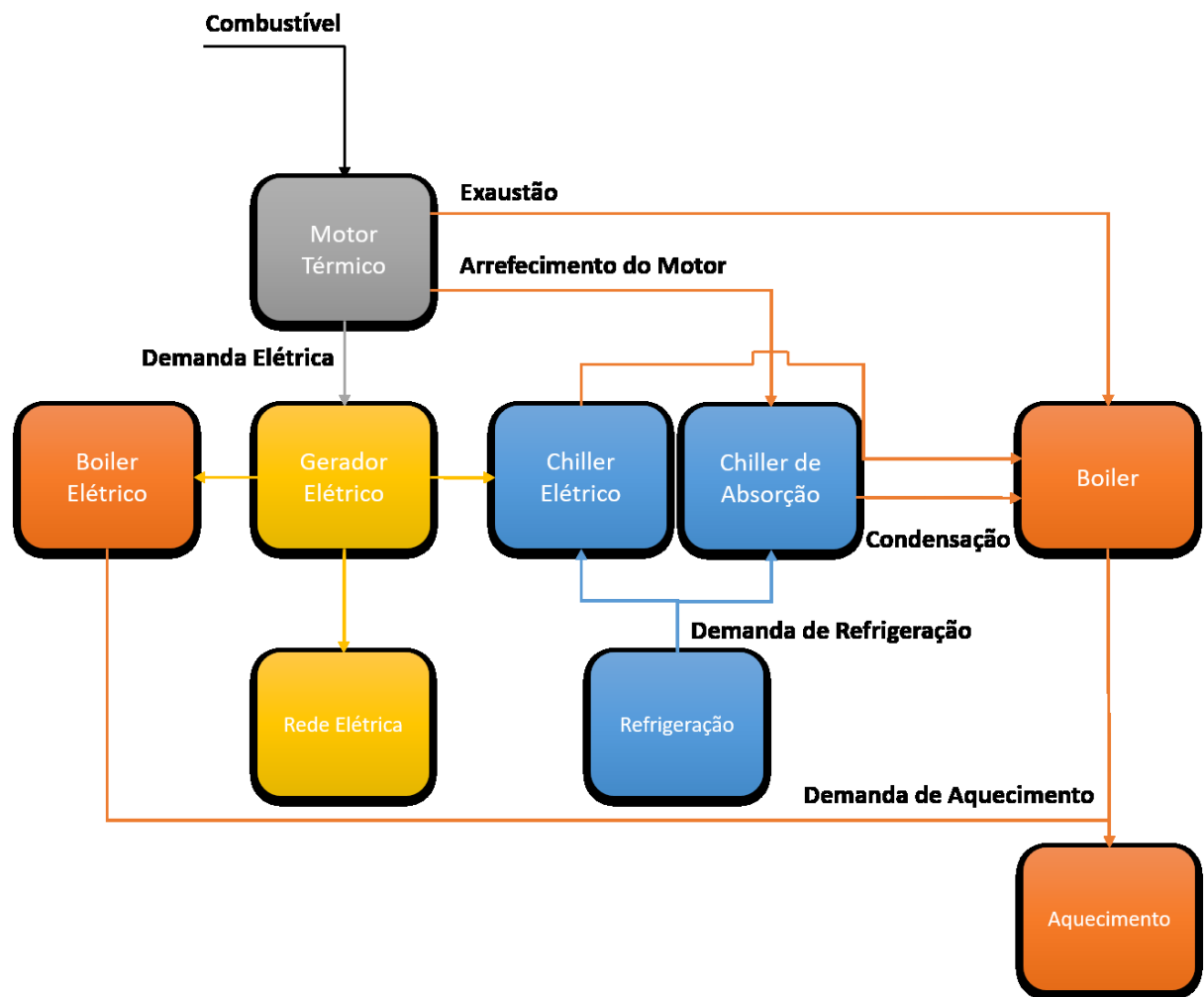


Figura 3.2: Segunda Arquitetura - Trigeração

Levando em consideração as Figuras 3.1 e 3.2, destaco as diferenças entre elas:

- Foi implementado um Boiler Elétrico reserva na segunda arquitetura, será ativado apenas quando a capacidade de aproveitamento do calor útil para refrigeração for insuficiente frente a demanda.
- Da mesma forma, foi implementado um Chiller Elétrico como reserva, que será ativado apenas quando a capacidade de aproveitamento do calor útil para refrigeração for insuficiente frente a demanda.

- Visando simplificar o destino do calor útil, este trabalho destinará o calor útil da exaustão ao Boiler, atendendo o aquecimento; O calor útil do arrefecimento do motor será destinado ao Chiller de Absorção, atendendo à refrigeração.

Esta arquitetura será desenvolvida nos moldes do modelo termodinâmico que será visto futuramente, dado que demonstra o ganho que o hospital usufruiria energeticamente caso recuperasse seu calor útil. Portanto será um dos pontos-chaves de nossa comparação.

4 Termoacumulação

Termoacumulação é o acúmulo de energia térmica em excesso, que seria rejeitada, para uso posterior. Trabalhando este conceito conjuntamente à segunda arquitetura, termoacumulação ocorreria quando a capacidade de refrigeração do chiller de absorção for superior à demanda de refrigeração e/ou a capacidade de aquecimento do boiler for superior à demanda de aquecimento. Por serem sistemas de temperaturas distintas, um relativamente frio e outro relativamente quente, possuem sistemas de termoacumulação distintos.

Outro ponto relevante sobre a termoacumulação, é que seu uso é geralmente destinado aos períodos nos quais a tarifa de energia é mais cara, como o horário de ponta estabelecido pelas concessionárias. Ao usar o tanque de termoacumulação no lugar do acionamento de energia elétrica, poupa-se a compra de energia elétrica para a refrigeração do estabelecimento. Porém, dado que toda energia do hospital é supostamente suprido apenas pelo seu gerador elétrico, não há distinção da tarifa de energia entre horas, sendo a tarifa um proporcional do preço do combustível consumido pelo motor térmico.

Neste trabalho não serão analisados os meios de retenção de calor para a termoacumulação, que podem ser: sal líquido, tanques líquidos, minérios/pedras e outras tecnologias.

4.1 Terceira Arquitetura – Trigeração com Termoacumulação

Munindo-se dos conceitos acima, implementaremos então a termoacumulação na segunda arquitetura – trigeração com termoacumulação, gerando a terceira arquitetura, conforme abaixo.

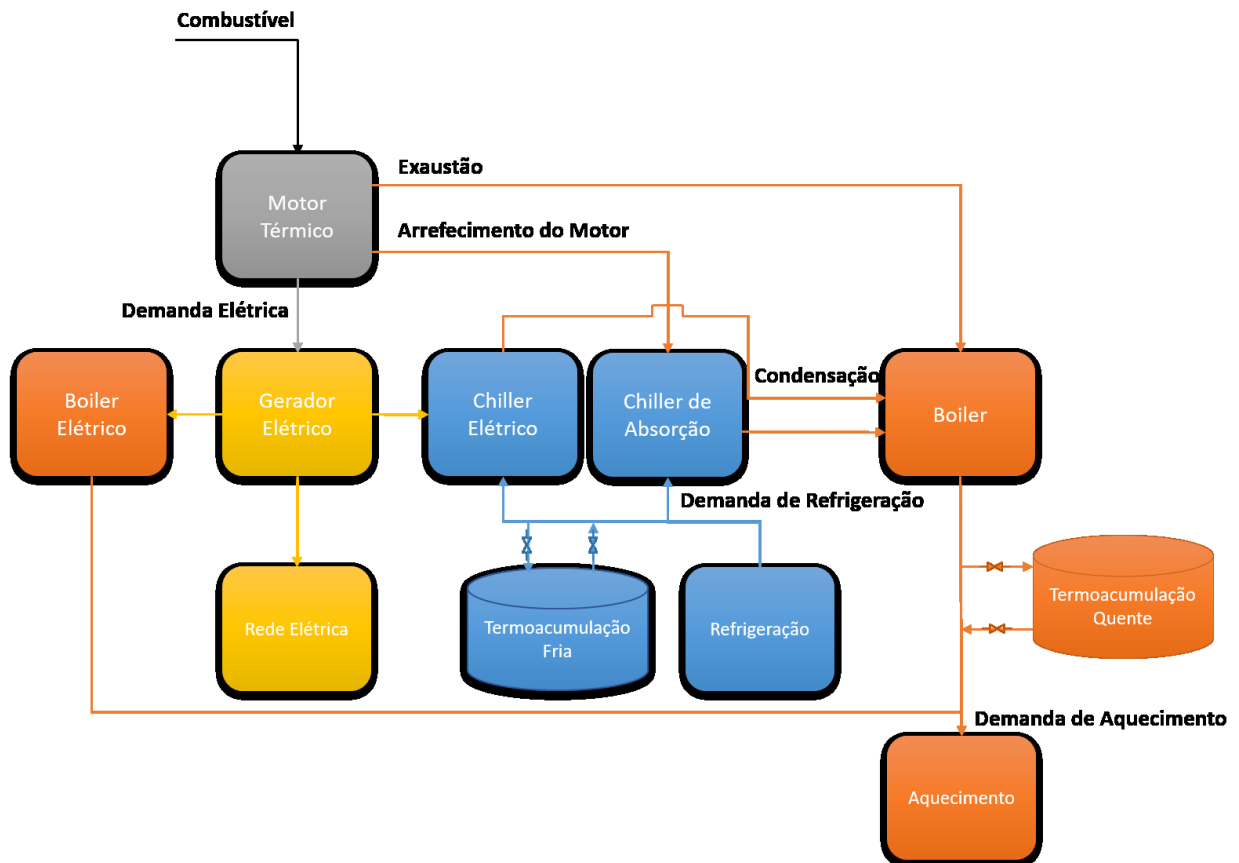


Figura 4.1: Terceira Arquitetura - Trigeração com Termoacumulação

Reiterando:

- Foi implementada a Termoacumulação Fria, que ocorrerá apenas quando a capacidade de refrigeração do Chiller de Absorção for superior à demanda de refrigeração, evento restrito simbolizado pelas válvulas. A descarga energética do tanque de termoacumulação fria ocorrerá em qualquer momento que o Chiller Elétrico precisa ser acionado, assumindo sua necessidade parcial ou integralmente, de acordo com a carga do tanque.

- Também foi implementada a Termoacumulação Quente, que ocorrerá apenas quando a capacidade de aquecimento do Boiler for superior à demanda de aquecimento, evento restrito simbolizado pelas válvulas. A descarga energética do tanque de termoacumulação quente ocorrerá em qualquer momento que o Boiler Elétrico precisar ser acionado, assumindo sua necessidade parcial ou integralmente, de acordo com a carga do tanque.

5 Modelo Matemático

Definidas as arquiteturas e compreendidas suas esquemáticas, seguimos para a definição do modelo matemático que as descreve, o qual teve sua lógica implementada em MATLAB.

É importante lembrar que o objetivo principal deste trabalho é identificar a economia gerada no total de energia gasta pelo sistema de atendimento às demandas na implementação da segunda ou terceira arquitetura, frente à primeira, que é o *status quo* do hospital.

Todo equacionamento exposto abaixo se baseou no princípio básico de conservação de energia – a 1ª lei da termodinâmica. Aliados a este princípio, estão os fluxogramas das arquiteturas, que auxiliam na visualização do fluxo de energia.

5.1 Modelo Matemático da Primeira Arquitetura

Dado que as equações abaixo dependerão de certas constantes, exponho a Figura 5.1, que é a Figura 2.9 (arquitetura energética original do hospital) com as constantes devidamente posicionadas de acordo com seu vínculo.

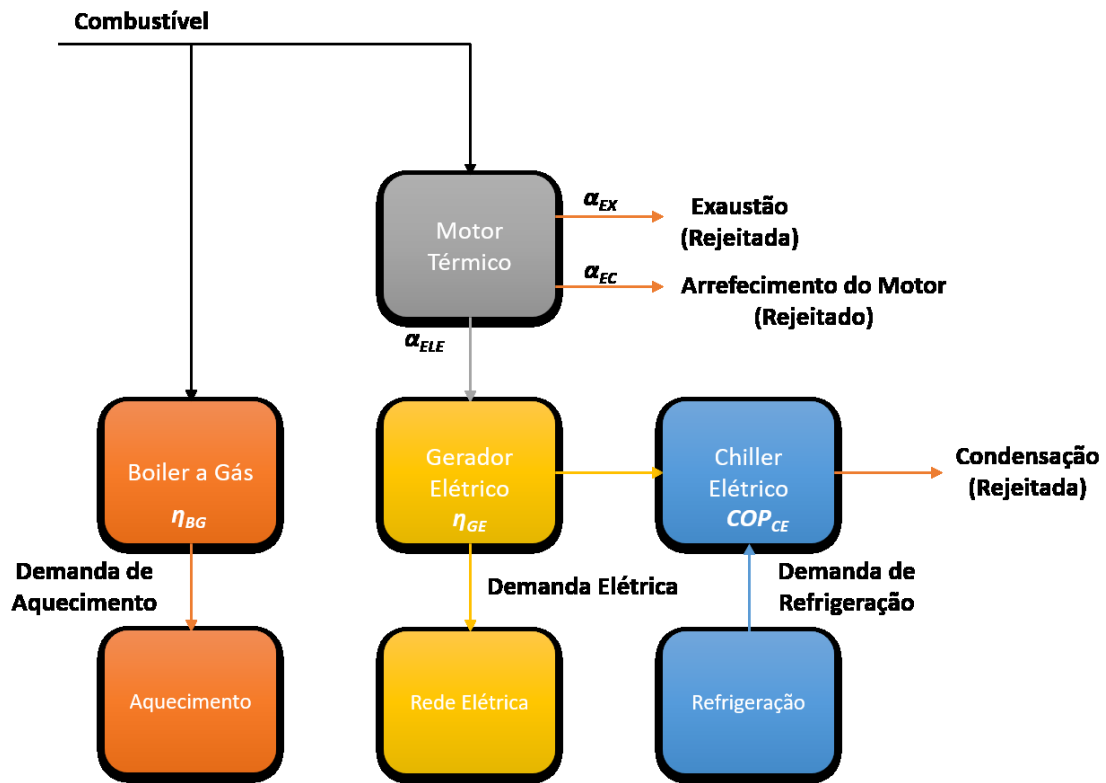


Figura 5.1: Primeira Arquitetura – Detalhes Expostos

Frente à Figura 2.9, a Figura 5.1 apresenta as seguintes informações adicionais:

- As frações da energia gerada pelo motor destinadas:
 - À exaustão, α_{EX} ;
 - Ao arrefecimento do motor ou *engine cooling*, α_{EC} ;
 - Ao gerador elétrico, α_{ELE} .
- As eficiências das máquinas necessárias ao atendimento das demandas, como:
 - η_{BG} , a eficiência do boiler à gás;
 - η_{GE} , a eficiência do gerador elétrico;
 - COP_{CE} , o COP do chiller elétrico.

Levando em consideração os detalhes implementados acima, partimos para a formulação matemática da primeira arquitetura.

$$\begin{array}{l}
 \text{Seja: } \left\{ \begin{array}{l}
 i \text{ o instante, em horas} \\
 AQ(i) \text{ a demanda de aquecimento para o instante } i - \text{kWh} \\
 BOILER_{GAS}(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Boiler à Gás para o instante } i - \text{kWh} \\
 ELE(i) \text{ a demanda elétrica para o instante } i - \text{kWh} \\
 GE(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Gerador Elétrico para o instante } i - \text{kWh} \\
 REF(i) \text{ a demanda de refrigeração para o instante } i - \text{kWh} \\
 CHILLER_{ELE}(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Chiller Elétrico para o instante } i - \text{kWh} \\
 \text{As demais constantes adimensionais citadas acima} \\
 COMBUSTIVEL(i) \text{ a energia necessária para o atendimento às demandas em } i - \text{kWh}
 \end{array} \right.
 \end{array}$$

$$\text{Aquecimento: } BOILER_{GAS}(i) = \frac{AQ(i)}{\eta_{BG}}$$

$$\text{Refrigeração: } CHILLER_{ELE}(i) = \frac{REF(i)}{COP_{CE}}$$

$$\text{Eletricidade: } GE(i) = \frac{CHILLER_{ELE}(i) + ELE(i)}{\eta_{GE}}$$

$$\text{Total de Energia Consumida: } COMBUSTIVEL(i) = BOILER_{GAS}(i) + \frac{GE(i)}{\alpha_{ELE}}$$

5.2 Modelo Matemático da Segunda Arquitetura

Seguindo o mesmo procedimento da demonstração do modelo matemático da primeira arquitetura, primeiramente exponho a Figura 5.2, que se baseia na Figura 3.2 (segunda arquitetura – trigerção), com os devidos detalhes adicionais.

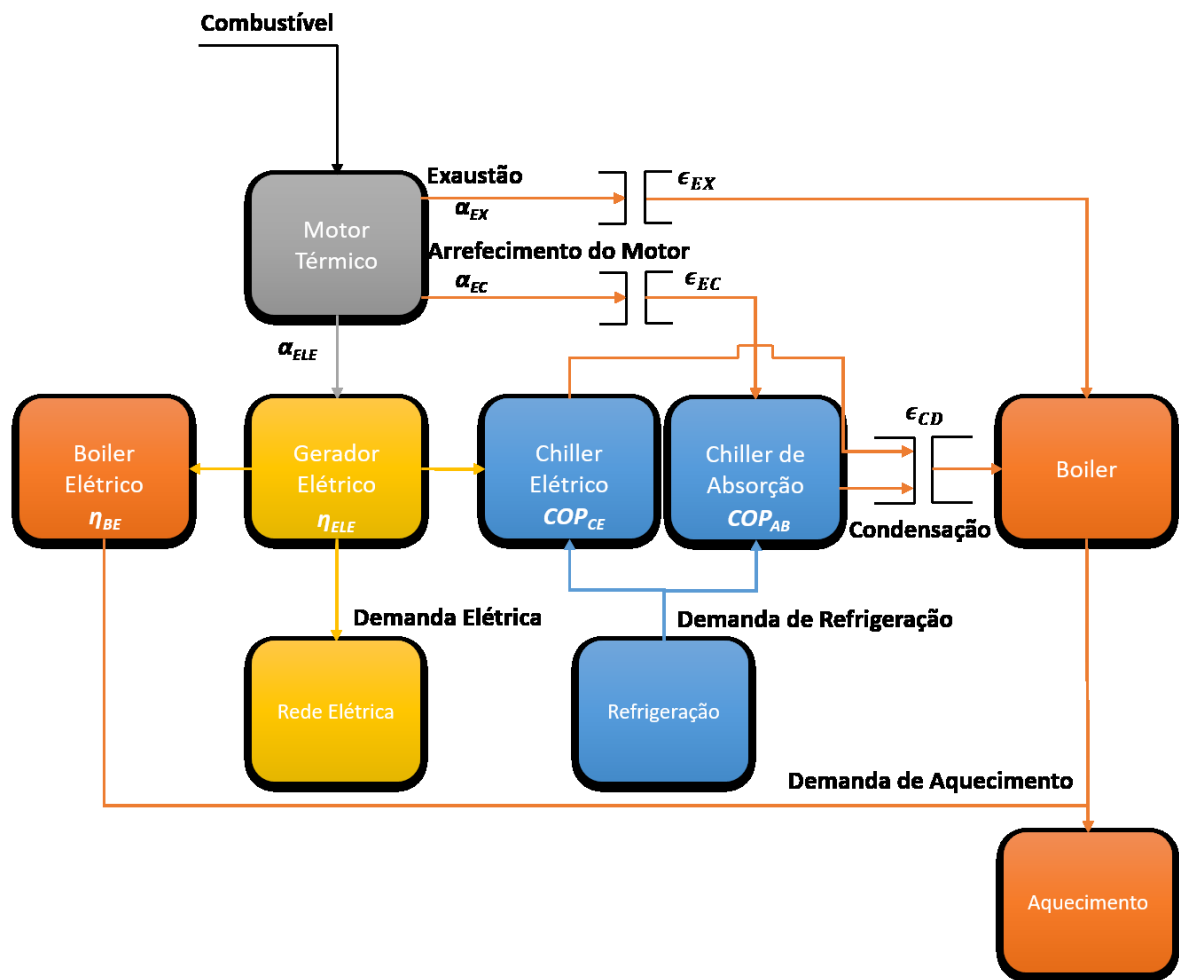


Figura 5.2: Segunda Arquitetura – Detalhes Expostos

Frente às Figuras 3.2 e 5.1, a Figura 5.2 apresenta as seguintes informações adicionais:

- As eficiências os trocadores de calor necessários ao aproveitamento do calor útil, como:
 - ϵ_{EX} , trocador de calor que recupera o calor útil da exaustão;
 - ϵ_{EC} , trocador de calor que recupera o calor útil do arrefecimento;
 - ϵ_{CD} , trocador de calor que recupera o calor útil da condensação;

- As eficiências das máquinas não previstas na primeira arquitetura, necessárias ao atendimento das demandas, como:
 - η_{BE} , a eficiência do boiler elétrico;
 - COP_{AB} , o COP do chiller de absorção.

Levando em consideração os detalhes implementados acima, partimos para a formulação matemática da segunda arquitetura.

$$\text{Seja: } \left\{ \begin{array}{l}
 i \text{ o instante, em horas} \\
 AQ(i) \text{ a demanda de aquecimento para o instante } i - kWh \\
 BOILER(i) \text{ a energia ser produzida pelo Boiler para o instante } i - kWh \\
 BOILER_{ELE}(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Boiler Elétrico para o instante } i - kWh \\
 ELE(i) \text{ a demanda elétrica para o instante } i - kWh \\
 GE(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Gerador Elétrico para o instante } i - kWh \\
 REF(i) \text{ a demanda de refrigeração para o instante } i - kWh \\
 CHILLER_{ELE}(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Chiller Elétrico para o instante } i - kWh \\
 CHILLER_{AB}(i) \text{ a energia a ser consumida pelo Chiller Absorção para o instante } i - kWh \\
 CONDESACAO(i) \text{ a energia disponível através da Condensação dos Chillers em } i - kWh \\
 \text{As demais constantes adimensionais citadas acima} \\
 COMBUSTIVEL(i) \text{ a energia necessária para o atendimento às demandas em } i - kWh
 \end{array} \right.$$

$$\text{Refrigeração: } \left\{ \begin{array}{l}
 CHILLER_{AB}(i) = COMBUSTIVEL(i) \alpha_{EC} \epsilon_{EC} \\
 CHILLER_{ELE}(i) = \begin{cases} \frac{\left(REF(i) - \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} \right)}{COP_{ELE}}, & \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} < REF(i) \\ 0, & \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} \geq REF(i) \end{cases} \\
 CONDENSACAO(i) = (CHILLER_{AB}(i) (COP_{AB} + 1) + CHILLER_{ELE}(i) (COP_{CE} + 1)) \epsilon_{CD}
 \end{array} \right.$$

$$Aquecimento: \begin{cases} BOILER(i) = COMBUSTIVEL(i)\alpha_{EX}\epsilon_{EX} + CONDENSACAO(i) \\ BOILER_{ELE}(i) = \begin{cases} \frac{(AQ(i) - BOILER(i))}{\eta_{BE}}, & BOILER(i) < AQ(i) \\ 0, & BOILER(i) \geq AQ(i) \end{cases} \end{cases}$$

$$Eletricidade: GE(i) = \frac{CHILLER_{ELE}(i) + BOILER_{ELE}(i) + ELE(i)}{\eta_{GE}}$$

$$Total\ de\ Energia\ Consumida: COMBUSTIVEL(i) = \frac{GE(i)}{\alpha_{ELE}}$$

Conforme afirmado anteriormente, o modelo matemático prevê o uso circunstancial do Boiler Elétrico e Chiller Elétrico, acionados apenas mediante a insuficiência da recuperação de calor útil pelo Chiller de Absorção e Boiler.

O sistema acima é determinado, dado que a única variável função $GE(i)$ é $COMBUSTIVEL(i)$, que é calculado no último passo deste equacionamento.

5.3 Modelo Matemático da Terceira Arquitetura

Prosseguindo a lógica implementada na demonstração do modelo matemático da segunda arquitetura, exponho a Figura 5.3, que se baseia nas Figuras 5.2 (segunda arquitetura – detalhes expostos) e 4.1 (terceira arquitetura – trigeração com termoacumulação), com os devidos detalhes adicionais.

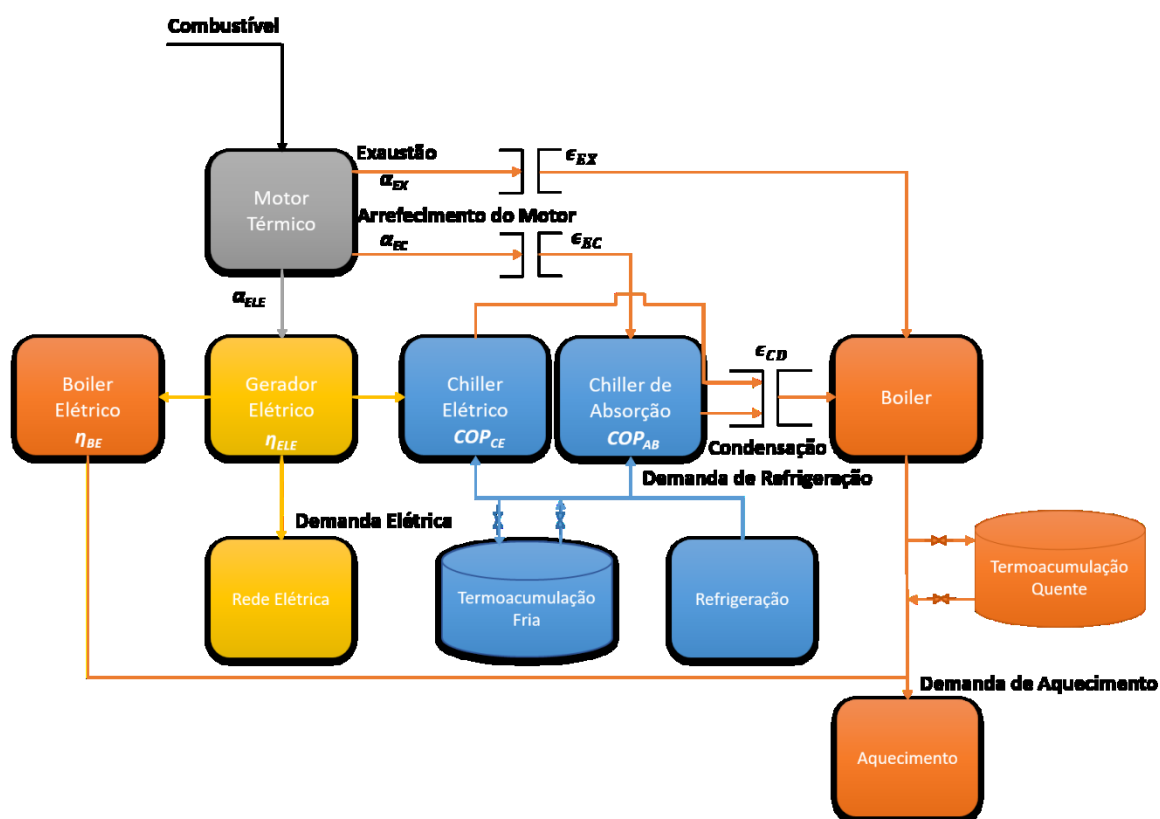


Figura 5.3: Terceira Arquitetura – Detalhes Expostos

Frente às Figuras 5.2 e 4.1, a Figura 5.3 usa a base estrutural da Figura 4.1 e implementa todas as constantes adimensionais e trocadores de calor da Figura 5.2, citados anteriormente.

Levando em consideração os detalhes implementados acima, partimos para a formulação matemática da terceira arquitetura:

i o instante, em horas

$AQ(i)$ a demanda de aquecimento para o instante i – kWh

$BOILER(i)$ a energia ser produzida pelo Boiler para o instante i – kWh

$BOILER_{ELE}(i)$ a energia a ser consumida pelo Boiler Elétrico para o instante i – kWh

$TA_{QUENTE}(i)$ a energia "quente" a ser armazenada ou utilizada em i – kWh

$ELE(i)$ a demanda elétrica para o instante i – kWh

$GE(i)$ a energia a ser consumida pelo Gerador Elétrico para o instante i – kWh

$REF(i)$ a demanda de refrigeração para o instante i – kWh

$CHILLER_{ELE}(i)$ a energia a ser consumida pelo Chiller Elétrico para o instante i – kWh

$CHILLER_{AB}(i)$ a energia a ser consumida pelo Chiller Absorção para o instante i – kWh

$TA_{FRIA}(i)$ a energia "fria" a ser armazenada ou utilizada em i – kWh

$CONDESACAO(i)$ a energia disponível através da Condensação dos Chillers em i – kWh

As demais constantes adimensionais citadas acima

$COMBUSTIVEL(i)$ a energia necessária para o atendimento às demandas em i – kWh

Seja:

Refrigeração:

$$CHILLER_{AB}(i) = COMBUSTIVEL(i) \alpha_{EC} \epsilon_{EC}$$

$$CHILLER_{ELE}(i) = \begin{cases} \frac{\left(REF(i) - \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} - TA_{FRIA}(i) \right)}{COP_{ELE}}, & \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} + TA_{FRIA}(i) < REF(i) \\ 0, & \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} + TA_{FRIA}(i) \geq REF(i) \end{cases}$$

$$TA_{FRIA}(i+1) = \begin{cases} TA_{FRIA}(i) + \frac{CHILLER_{AB}(i)}{COP_{AB}} - REF(i), & CHILLER_{ELE}(i) = 0 \\ 0, & CHILLER_{ELE}(i) > 0 \end{cases}$$

$$CONDENSACAO(i) = (CHILLER_{AB}(i) (COP_{AB} + 1) + CHILLER_{ELE}(i) (COP_{CE} + 1)) \epsilon_{CD}$$

$$\begin{aligned}
& BOILER(i) = COMBUSTIVEL(i)\alpha_{EX}\epsilon_{EX} + CONDENSACAO(i) \\
Aquecimento: & \left\{ \begin{aligned} & BOILER_{ELE}(i) = \begin{cases} \frac{(AQ(i) - BOILER(i) - TA_{QUENTE}(i))}{\eta_{BE}}, & BOILER(i) + TA_{QUENTE}(i) < AQ(i) \\ 0, & BOILER(i) + TA_{QUENTE}(i) \geq AQ(i) \end{cases} \\ & TA_{QUENTE}(i+1) = \begin{cases} TA_{QUENTE}(i) + BOILER(i) - AQ(i), & BOILER_{ELE}(i) = 0 \\ 0, & BOILER_{ELE}(i) > 0 \end{cases} \end{aligned} \right.
\end{aligned}$$

$$\text{Eletricidade: } GE(i) = \frac{CHILLER_{ELE}(i) + BOILER_{ELE}(i) + ELE(i)}{\eta_{GE}}$$

$$\text{Total de Energia Consumida: } COMBUSTIVEL(i) = \frac{GE(i)}{\alpha_{ELE}}$$

A terceira arquitetura modelo matemático prevê o uso circunstancial do Boiler Elétrico e Chiller Elétrico, acionados apenas mediante a insuficiência da recuperação de calor útil pelo Chiller de Absorção e Boiler, ambos suplementados pelos tanques de Termoacumulação Fria e Quente, respectivamente.

O sistema acima é determinado, dado que a única variável da função $GE(i)$ é $COMBUSTIVEL(i)$, que é calculado no último passo deste equacionamento.

5.4 Constantes

Para melhor compreender as constantes utilizadas, a Tabela 5.1 visa mostrar os valores numéricos utilizados para cada uma.

Tabela 5.1: Valores das Constantes

Constante	Valor
α_{EX}	$33, \overline{3} \%$
α_{EC}	$33, \overline{3} \%$
α_{ELE}	$33, \overline{3} \%$
ϵ_{EX}	$0,75$
ϵ_{EC}	$0,75$
ϵ_{CD}	$0,75$
η_{BG}	$0,80$
η_{BE}	$1,00$
η_{ELE}	$0,90$
COP_{CE}	$4,00$
COP_{AB}	$1,20$

5.5 Ressalvas

Certas simplificações foram adotadas para a execução deste trabalho, porém todas medidas adotadas são conceitualmente viáveis, a fim de não provocar quaisquer desobediências à base deste trabalho, que é a primeira lei da termodinâmica. São elas:

- O reaproveitamento total do calor, independentemente das temperaturas exigidas pelos sistemas;
- A inexistência de perdas através do tempo nos tanques de termoacumulação;
- A inexistência de perdas através da distância percorrida pela fonte de calor entre sistemas.

- A inexistência da curva de carga do motor térmico, variando suas frações de energia entre gerador, exaustão e arrefecimento de acordo com o trabalho produzido.
- A inexistência das limitações de potência máxima dos equipamentos, assume-se que todo equipamento é capaz de produzir qualquer quantidade de energia, não sendo eles especificados.
- Não há limite para a termoacumulação, porém como será visto à frente, isto não terá impacto, pois a capacidade máxima de termoacumulação exigida é baixa.

A extinção das simplificações expostas acima são módulos a serem implementados no Modelo Matemático das Arquiteturas. Mediante a implementação destes módulos, o Modelo se tornará cada vez mais próximo da realidade, inclusive tornando-se um produto de controle implementável em sistemas informatizados com sensoriamento.

6 Resultados do Código MATLAB

Implementados os Modelo Matemáticos, descritos na seção cinco (5) deste trabalho, para todas arquiteturas no MATLAB, partimos para a apresentação de resultados. Todas constantes adimensionais e curvas de demanda estão especificadas no código.

É importante salientar que foi criado um nono conjunto de dados, relativo a um ano inteiro de operação do Hospital, criado a partir dos perfis médios das estações. O ano foi criado a partir das quatro estações, cada estação possuindo 13 semanas, cada semana com cinco dias úteis e dois dias não úteis, com os dados especificados nas Figuras 1.1 a 1.8.

A importância deste conjunto de dados reside apenas na terceira arquitetura: termoacumulação. Através dele, torna-se possível utilizar a termoacumulação de um dado dia no dia seguinte.

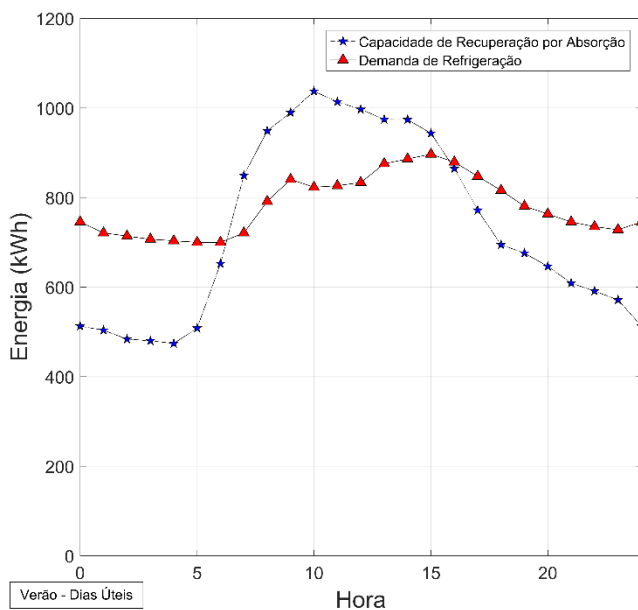
6.1 Resultados dos Primeiros Oito Conjuntos de Dados: Estações

Primeiro serão analisados os resultados relativos aos dias típicos de cada estação, gerados mediante a aplicação do modelo matemático. Esta seção é composta por cinco (5) subseções, apresentando cinquenta e seis (56) gráficos.

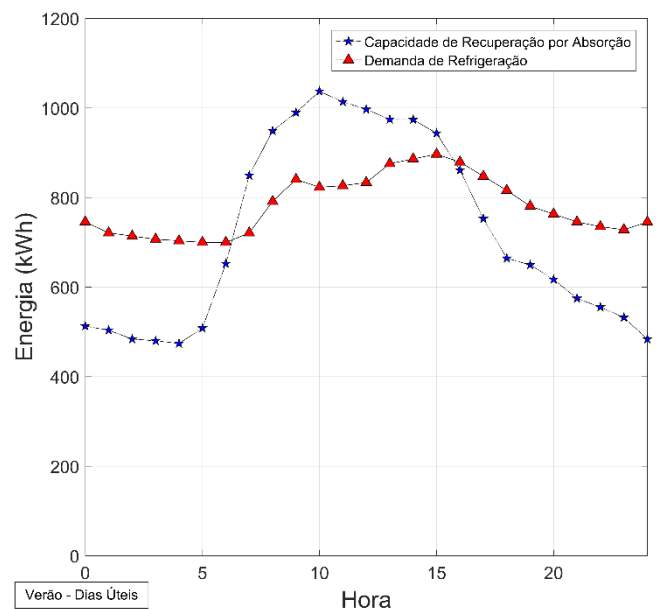
6.1.1 Capacidade de Termoacumulação Fria

A primeira subseção corresponde ao confronto gráfico entre a curva da capacidade de evaporação do Chiller de Absorção e a demanda por refrigeração. O título destes gráficos é “Capacidade de Termoacumulação Fria” pois, através deles, recebemos o indicativo de se é possível termoacumular, assim como se é desejável.

Conforme enunciado anteriormente, estaremos analisando os dados de tanto a segunda arquitetura quanto a terceira, devido às suas diferenças intrínsecas. Portanto, seguem abaixo as Figuras 6.1 a 6.8, correspondentes à Capacidade de Termoacumulação Fria nas quatro estações, para dias úteis e não úteis em ambas arquiteturas.



(a)



(b)

Figura 6.1: Capacidade de Termoacumulação Fria para Verão, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

À primeira vista, muitos dos gráficos desta seção parecerão iguais, porém é necessário um olho cuidadoso e algumas observações para destacar suas diferenças. Olhando para o ponto relativo às 16 horas, próximo à segunda interseção da curva da capacidade de recuperação por absorção com a demanda de refrigeração em ambos gráficos, percebemos que o ponto da curva da capacidade de recuperação por absorção está levemente deslocado. Outros pontos seguem este padrão.

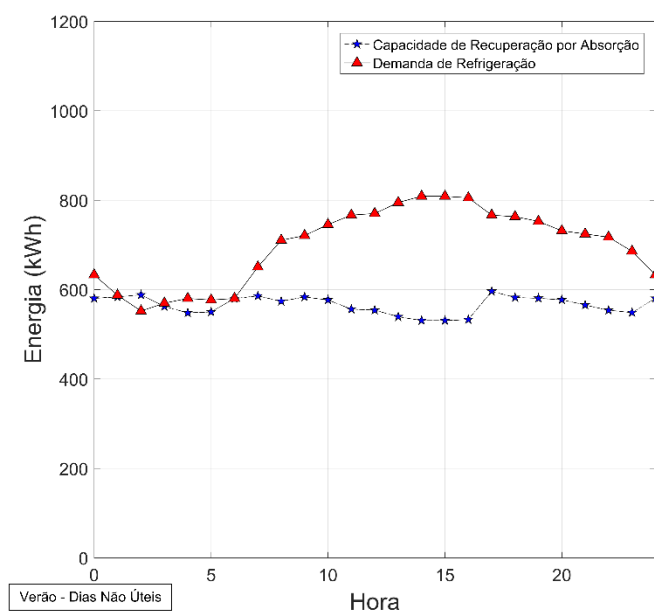
Primeiramente, deve-se notar que o ponto está deslocado para baixo na segunda arquitetura, ou seja, o potencial de recuperação para refrigeração é menor. Pelo modelo matemático, sabemos que o potencial de recuperação é diretamente proporcional à potência total do motor térmico, o que significa que está sendo consumida menos energia na terceira arquitetura.

O motivo pelo qual a terceira arquitetura está consumindo menos energia é justamente a implementação da termoacumulação, que neste dia ocorreu entre a

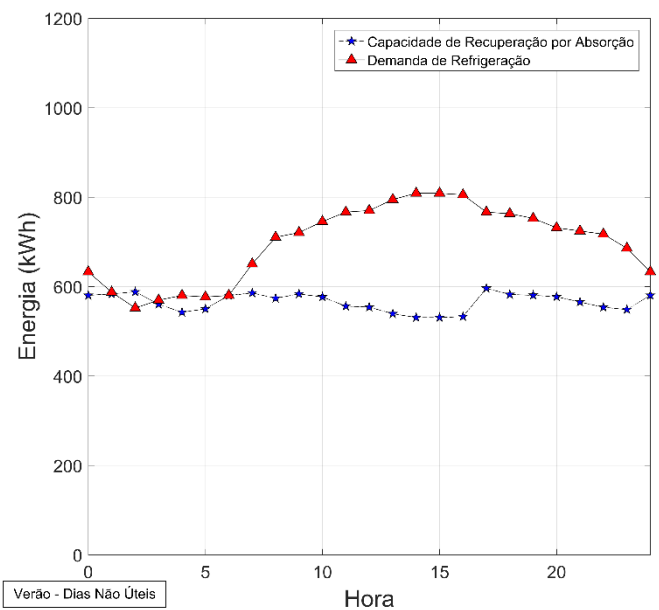
primeira e segunda interseção das curvas, passando a ser utilizada a partir das 16 horas, reduzindo o trabalho exigido pelo Chiller Elétrico e portanto reduzindo o total de energia consumindo, conforme também previsto no parágrafo anterior.

Adicionalmente, é bem clara a capacidade considerável de termoacumulação fria nos dias úteis de verão, dado que por 8 horas a capacidade de recuperação por absorção do sistema é superior à demanda de aquecimento.

Portanto, existe um menor potencial de capacidade de recuperação por Absorção a partir do início do uso do tanque de termoacumulação fria às 16 horas na terceira arquitetura relativamente à segunda, devido à redução do trabalho exigido pelo Chiller Elétrico. Porém, esta redução da capacidade de recuperação ainda foi claramente benéfica, dado que, por ser menor, é logicamente conclusivo que o total de energia consumido pelo sistema é proporcionalmente menor.



(a)

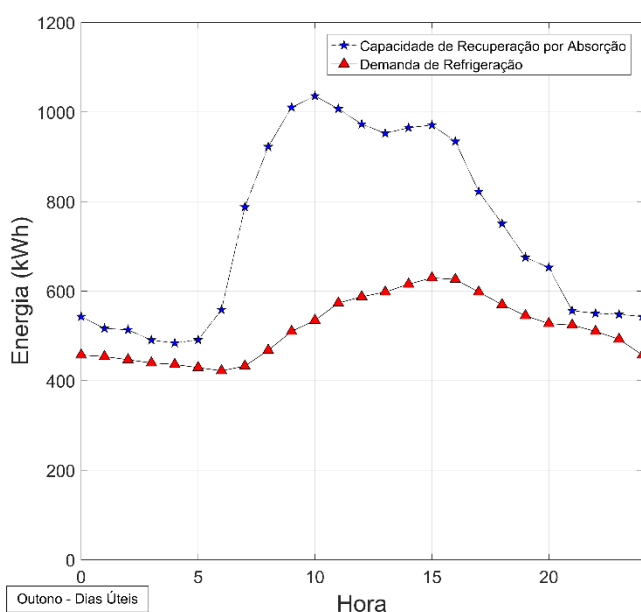


(b)

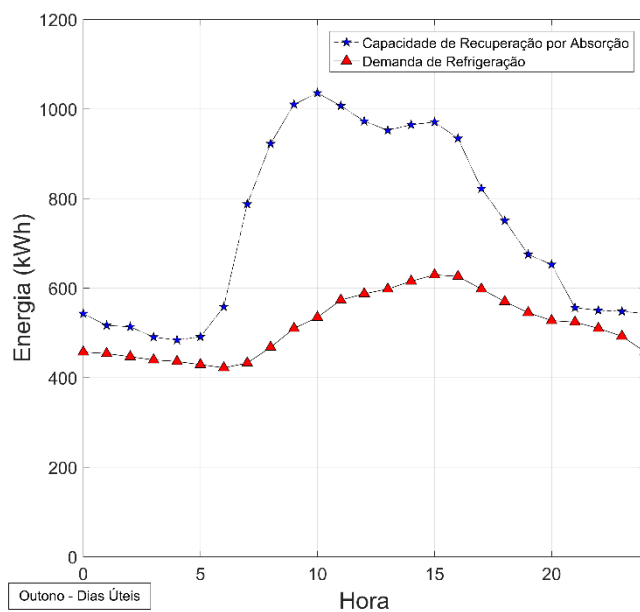
Figura 6.2: Capacidade de Termoacumulação Fria para Verão, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

Todas estações, por seguirem o mesmo Modelo Matemático, apresentaram os mesmos princípios apresentados nos dias úteis de Verão, porém haverá sempre variação nas curvas de demanda, por serem dados de base. Portanto, percebemos que sempre após um período de termoacumulação, haverá um período de economia de energia, dado que a termoacumulação seja exigida (“descarregada”).

No caso de dias não úteis de verão, a capacidade de termoacumulação é muito baixa, dado que a capacidade de recuperação por absorção é superior à demanda de refrigeração em uma única hora, com um pequeno diferencial. Portanto, é previsível que a economia para este caso será quase desprezível.



(a)



(b)

Figura 6.3: Capacidade de Termoacumulação Fria para Outono, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

No caso de dias úteis de outono, a capacidade de termoacumulação é muito alta, a ponto de a capacidade de recuperação por absorção ser superior à demanda

de refrigeração em todas as horas. Portanto, para dias úteis de outono, não há ganho na implementação da terceira arquitetura, dado que não há uso da termoacumulação fria.

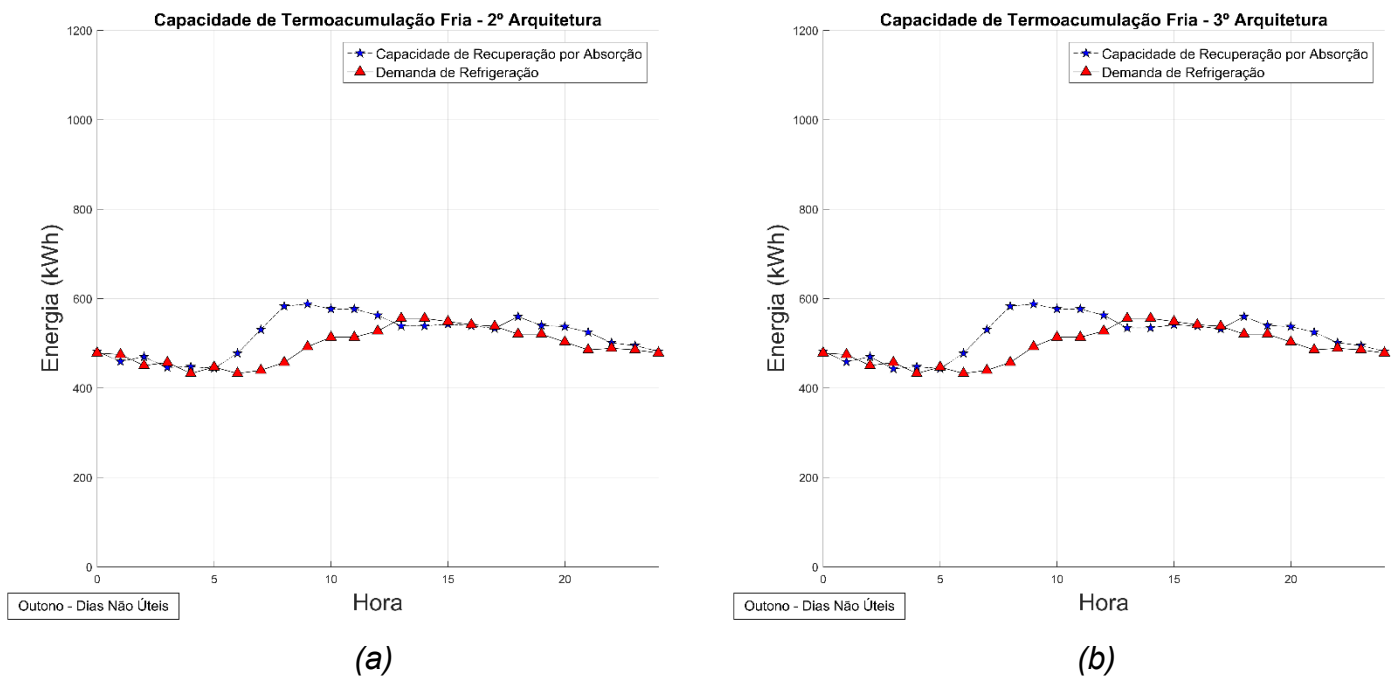
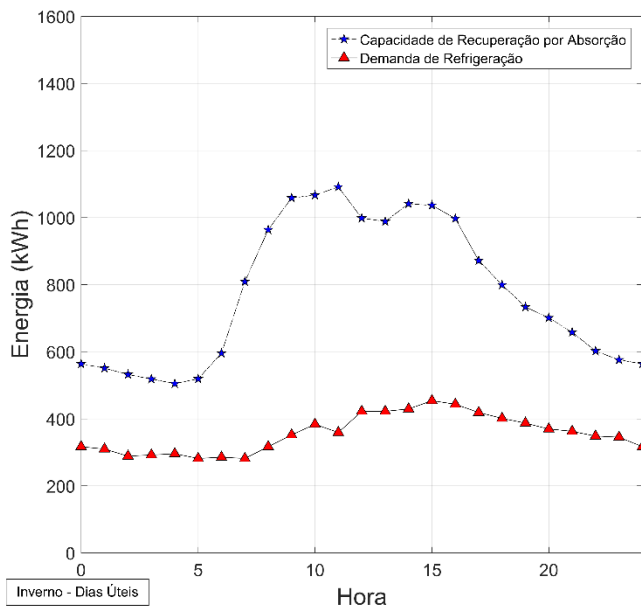
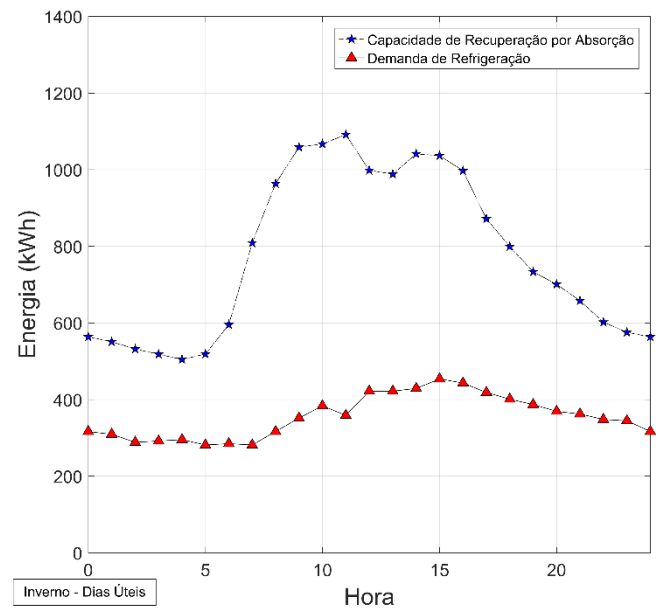


Figura 6.4: Capacidade de Termoacumulação Fria para Outono, Dias Não Úteis na:
(a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

Assim como no caso de dias úteis de outono, há uma clara variação horária na capacidade de termoacumulação, inclusive, diferentemente do visto nos outros gráficos desta seção, há termoacumulação no final do dia, que claramente poderia ser utilizada em algumas das primeiras horas. Portanto, para dias não úteis de outono, há ganho na implementação da terceira arquitetura, que será intensificado na análise de um ano.



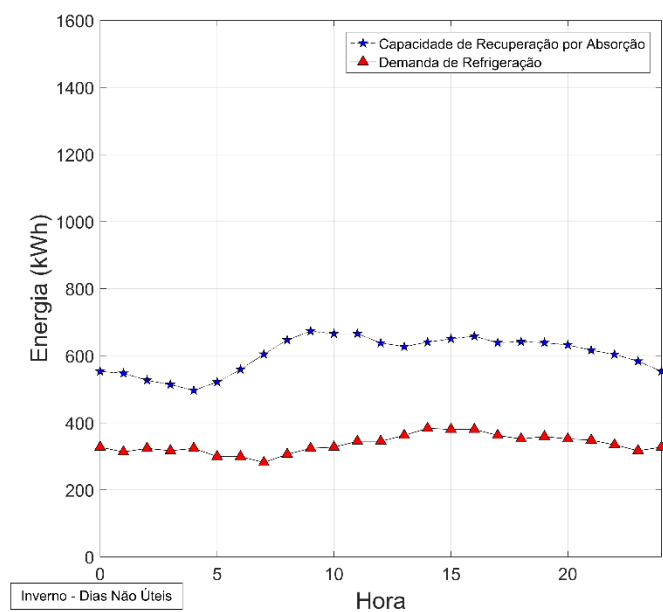
(a)



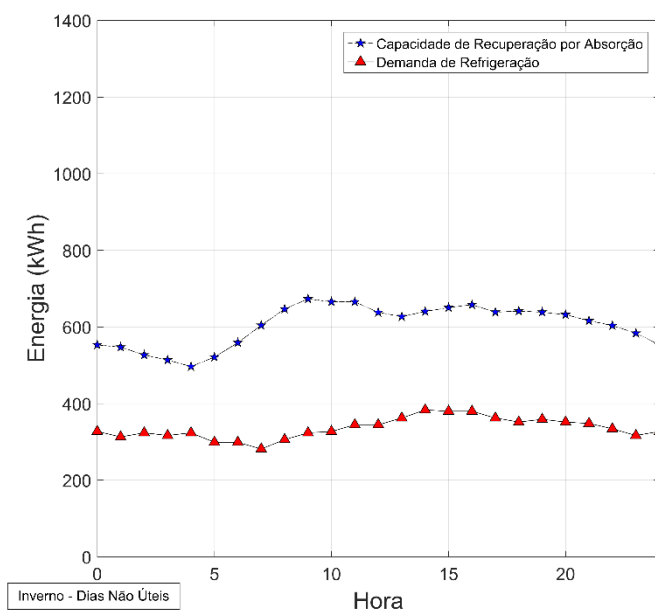
(b)

Figura 6.5: Capacidade de Termoacumulação Fria para Inverno, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

Assim como no caso de dias úteis de outono, os dias úteis de inverno possuem a capacidade de termoacumulação é muito alta, a ponto que a capacidade de recuperação por absorção é superior à demanda de refrigeração em todas horas. Portanto, para dias úteis de inverno, não há ganho na implementação da terceira arquitetura, dado que não há uso da termoacumulação fria.



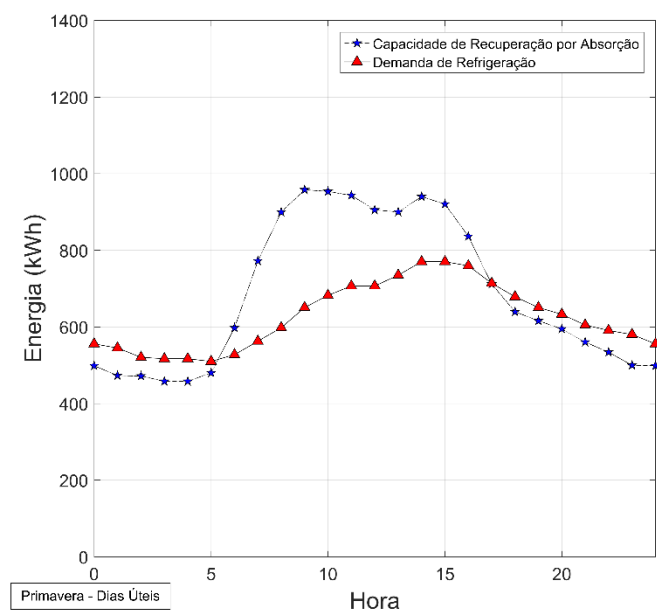
(a)



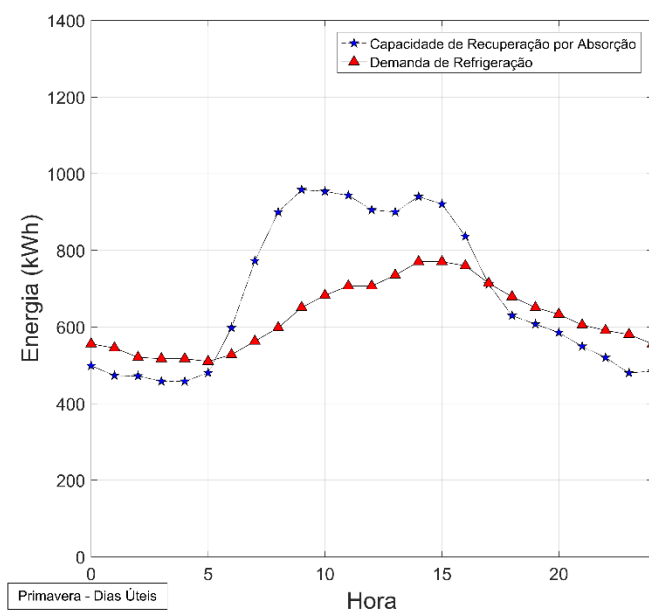
(b)

Figura 6.6: Capacidade de Termoacumulação Fria para Inverno, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

Assim como no caso de dias úteis, os dias não úteis de inverno possuem a capacidade de termoacumulação é muito alta, a ponto que a capacidade de recuperação por absorção é superior à demanda de refrigeração em todas horas. Portanto, para dias não úteis de inverno, não há ganho na implementação da terceira arquitetura, dado que não há uso da termoacumulação fria.



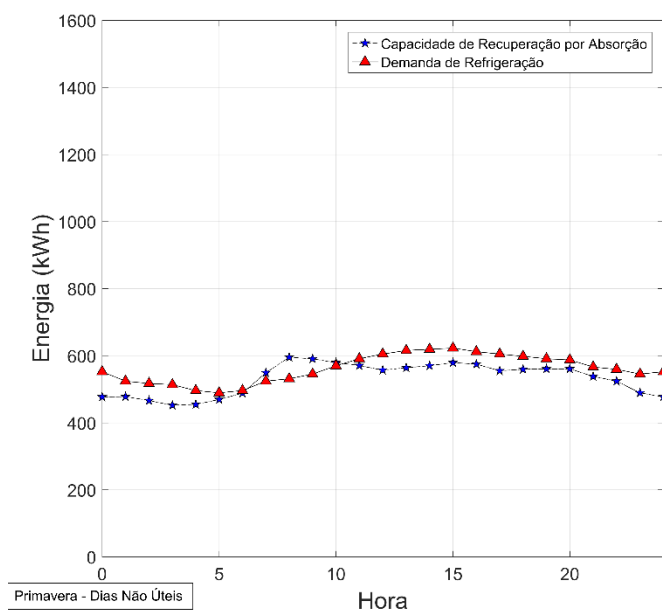
(a)



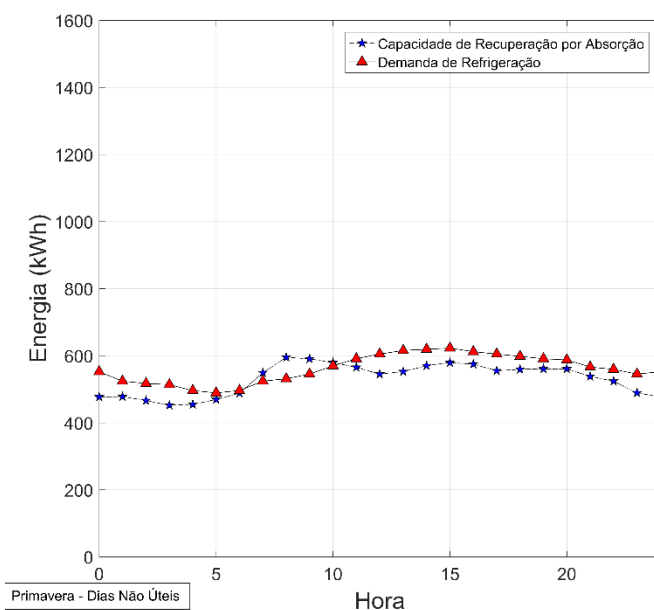
(b)

Figura 6.7: Capacidade de Termoacumulação Fria para Primavera, Dias Úteis na:
(a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

O caso de dias úteis de primavera é semelhante aos dias úteis de verão: a capacidade de termoacumulação ocorre ainda no início do dia, podendo ser utilizada após 17 horas. Claramente, haverá ganho na implementação da terceira arquitetura, dado que há uso da termoacumulação fria.



(a)



(b)

Figura 6.8: Capacidade de Termoacumulação Fria para Primavera, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

O caso de dias não úteis de primavera é semelhante aos dias não úteis de outono, havendo pouca capacidade de termoacumulação fria, porém desta vez com igualmente pouco uso. Haverá ganho na implementação da terceira arquitetura, apesar de pequeno na termoacumulação fria.

6.1.2 Uso da Termoacumulação Fria

Complementando a seção 6.1.1 Capacidade de Termoacumulação Fria, esta seção visa demonstrar a termoacumulação e seu respectivo uso na terceira arquitetura, auxiliando na percepção de seu benefício nos diversos casos. Para este propósito, usaremos os mesmos eixos, desta vez comparando a demanda por chiller elétrico com a energia armazenada na termoacumulação fria.

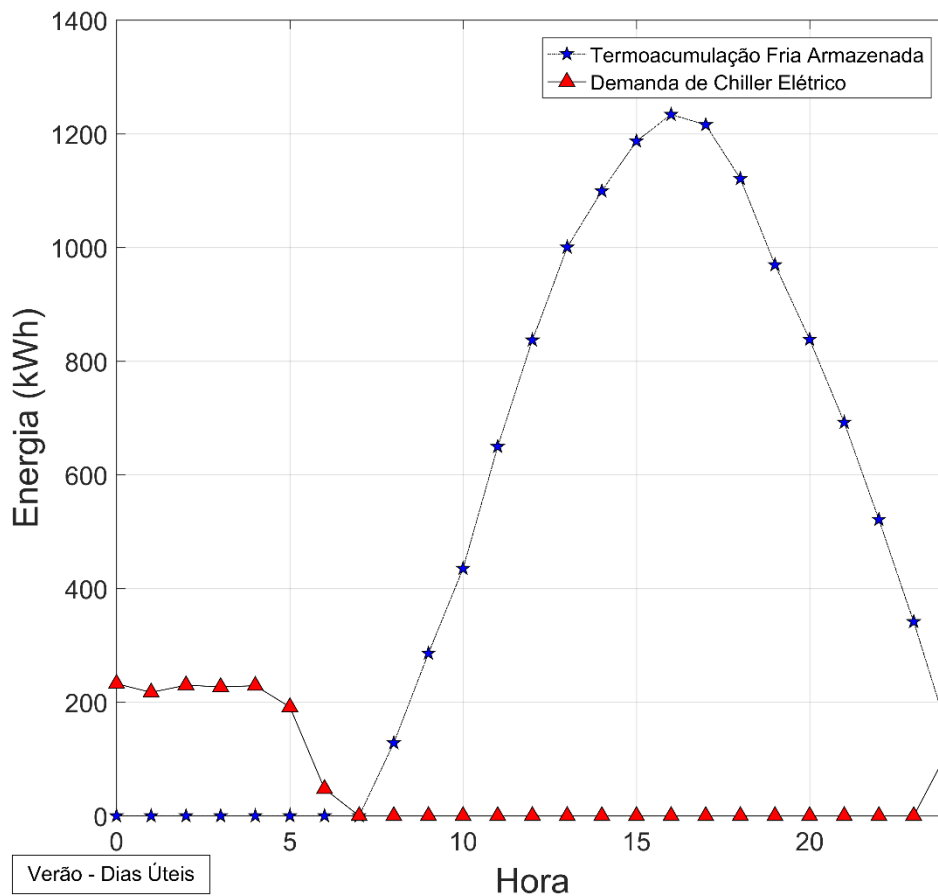


Figura 6.9: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Verão – Dias Úteis*

Conforme previmos na Figura 6.1, a termoacumulação ocorre a partir da sétima hora (visível com a ausência de demanda pelo Chiller Elétrico, daí ela passa a ser útil apenas na oitava hora.

Outro ponto observável é que, enquanto houver incremento na termoacumulação fria armazenada, podemos induzir que a capacidade de recuperação por absorção é superior à demanda de refrigeração, que ocorre até as 16 horas. A partir de então, a termoacumulação fria passa a ser utilizada até as 24 horas, quando é exaurida e assume apenas parcialmente a carga exigida do Chiller Elétrico.

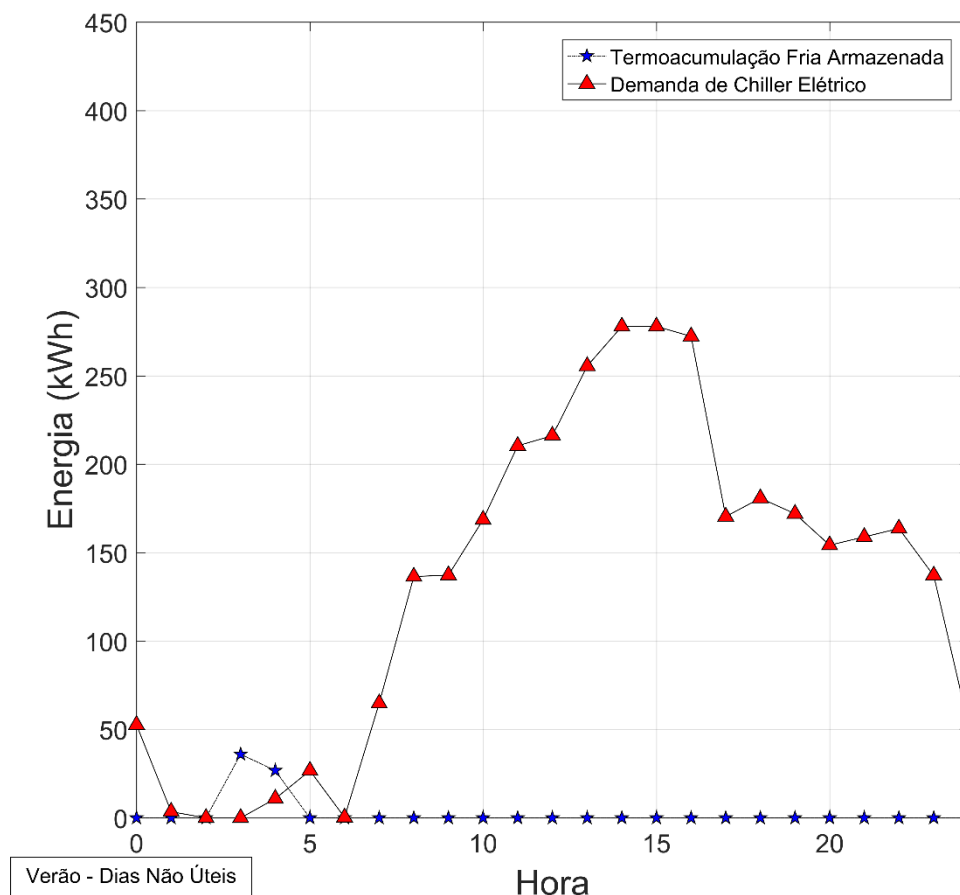


Figura 6.10: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Verão – Dias Não Úteis*

Os conceitos trabalhados na figura de Verão – Dias Úteis serão os mesmos para todas figuras desta subseção, por terem a mesma base lógica.

No caso dos dias não úteis de verão, fica evidenciado o quase nulo uso da capacidade de termoacumulação, dado que em dado instante apenas 40 kWh são termoacumulados. Porém, será um ganho consideravelmente maior considerando o período de um ano.

Dado que este gráfico apresenta um conceito não visível no caso de Verão – Dias Úteis, destaca-se: após um momento de uso do chiller elétrico conjuntamente à Termoacumulação, a Termoacumulação necessariamente deverá ser nula no instante seguinte, dado que atendeu parcialmente à carga até seu armazenamento total.

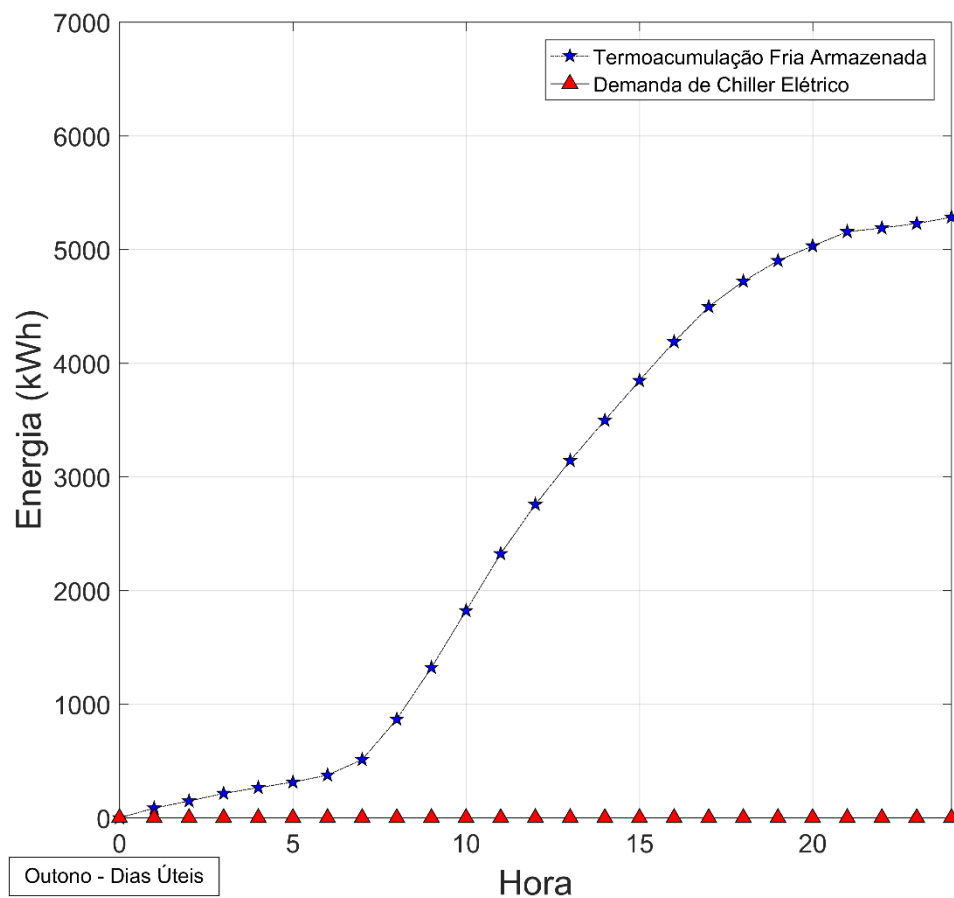


Figura 6.11: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Outono – Dias Úteis*

Conforme afirmado nas simplificações, não há capacidade máxima para a termoacumulação do tanque de termoacumulação fria nas estações, pois a análise é feita apenas para um dia. Porém, como pode ser visto na figura acima, inclusive nos dois casos anteriores, este fato não influenciou, dado que neste caso a termoacumulação nunca chega a ser utilizada, e nos casos anteriores o volume de energia máximo termoacumulado é consideravelmente pequeno frente ao disponível comercialmente.

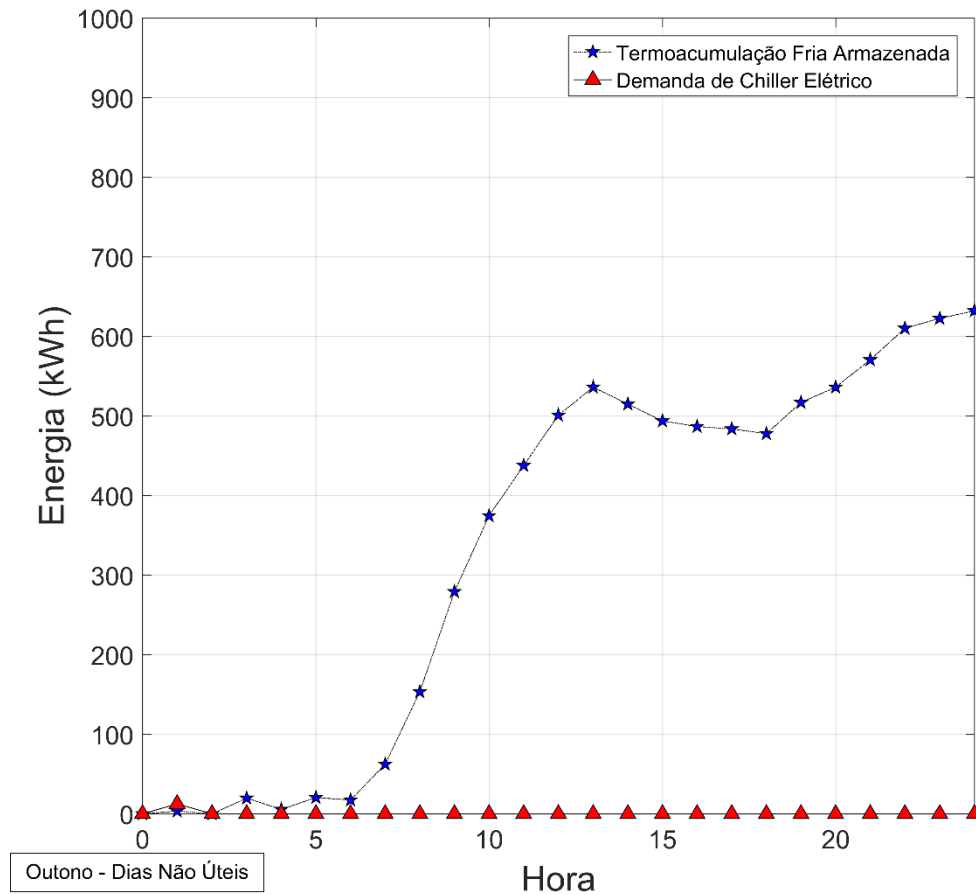


Figura 6.12: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Outono – Dias Não Úteis*

Diferentemente dos dias úteis, os dias não úteis de outono de fato usam a termoacumulação mais de uma vez ao longo do dia, identificados por três marcos ao longo do dia nos quais a energia armazenada na termoacumulação fria decresce em relação ao instante anterior. Mais à frente, veremos que haverá uma pequena economia na energia total consumida pelo sistema no Outono, graças a este perfil (dado que os dias úteis de Outono não contribuem para esta economia).

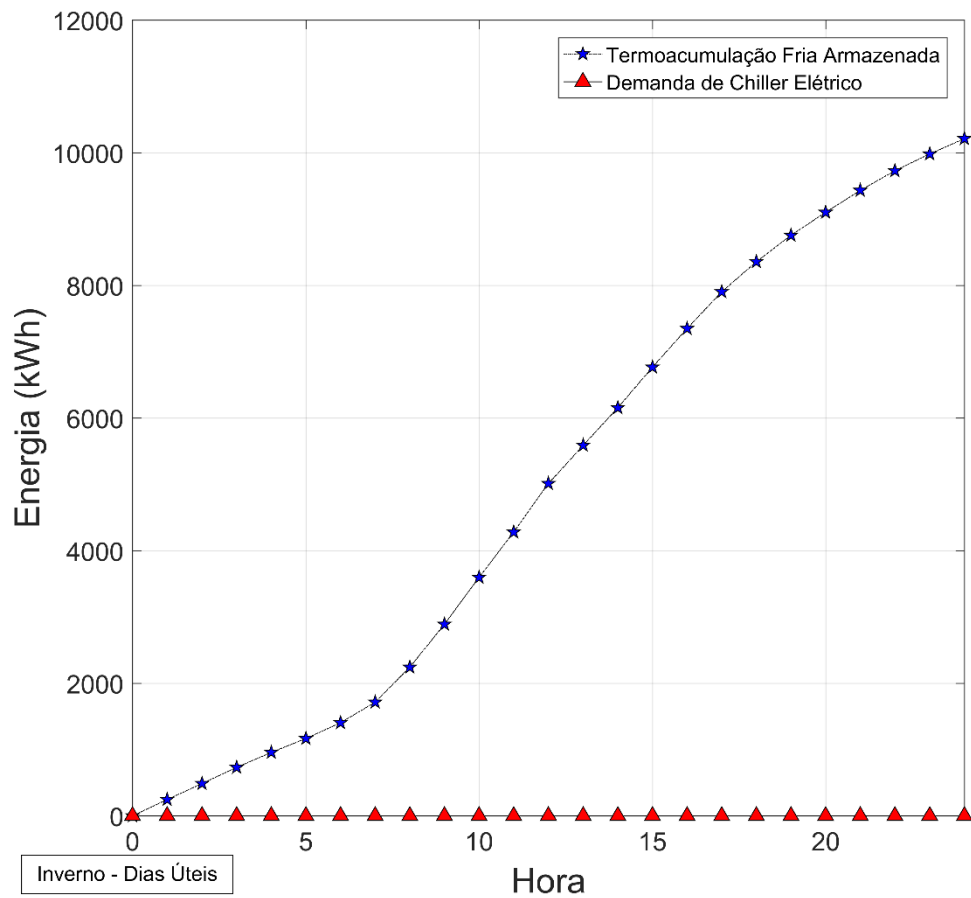


Figura 6.13: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Inverno – Dias Úteis*

Conforme intuição, por ser a estação mais fria, os dias úteis do inverno não preveem necessidade do uso do Chiller Elétrico, possuindo sempre capacidade de termoacumulação fria, gerando nenhum ganho frente a segunda arquitetura.

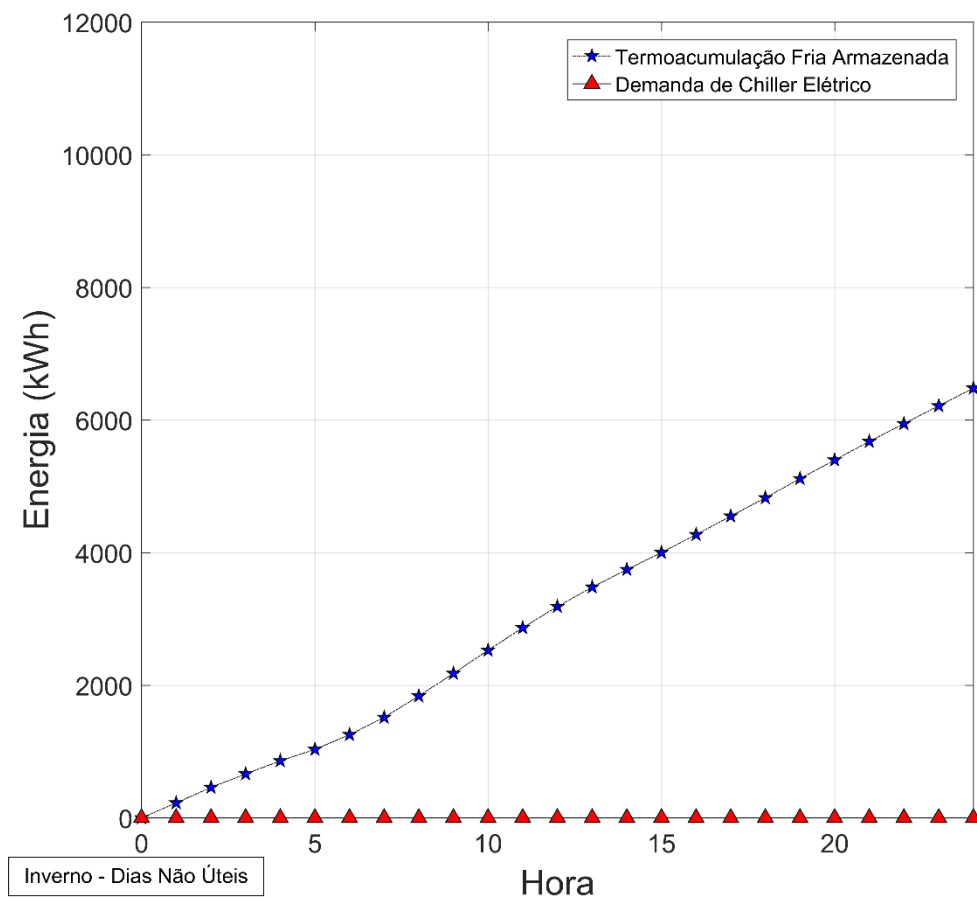


Figura 6.14: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura no Inverno – Dias Não Úteis*

Igualmente aos dias úteis, os dias não úteis do inverno não usufruem da termoacumulação fria, o que será visto no gráfico da economia gerada entre arquiteturas mais à frente.

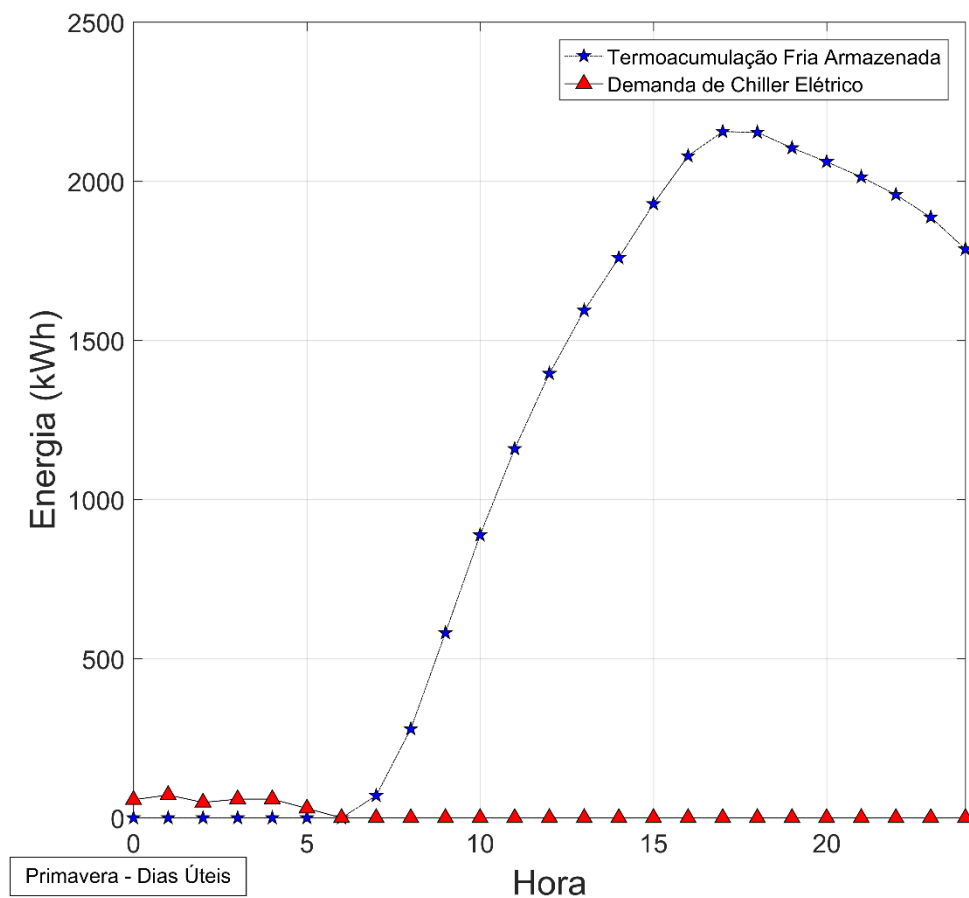


Figura 6.15: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura na Primavera – Dias Úteis*

O gráfico acima, Fig. 6.15, ilustra a relativamente alta capacidade de termoacumulação fria para dias úteis de primavera. Além do armazenamento, há o claro e considerável uso. Portanto, há ganho na implementação da terceira arquitetura para este caso.

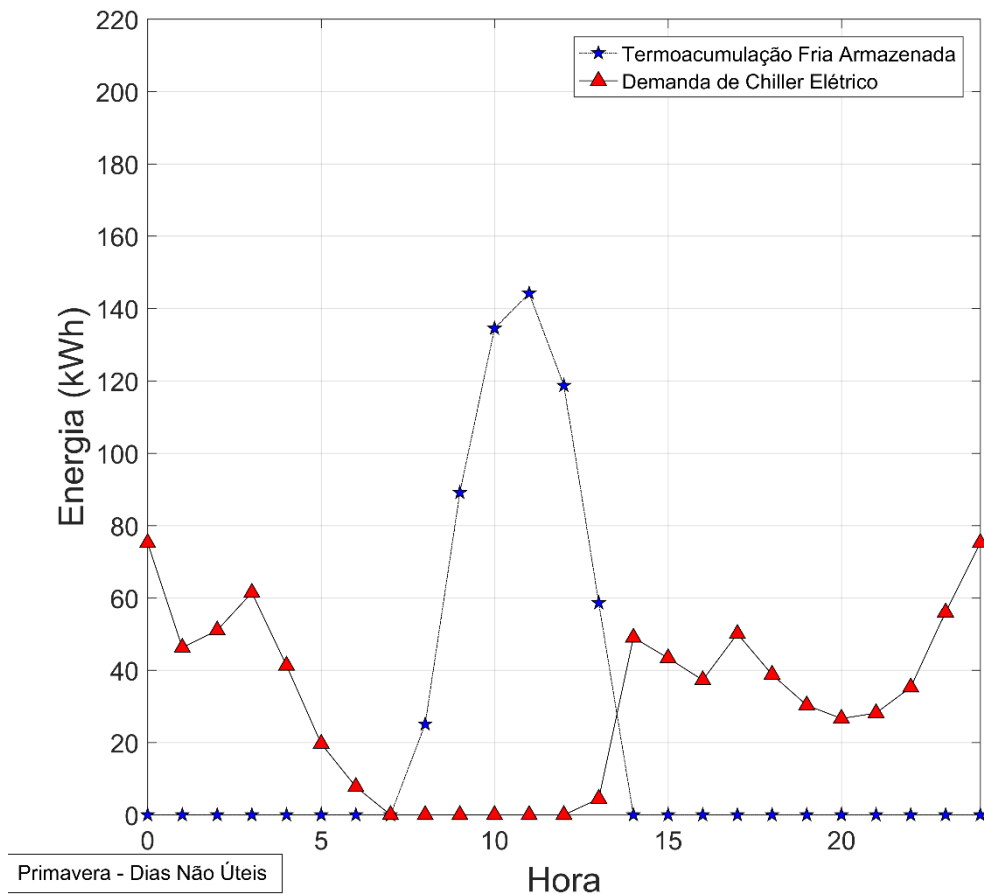
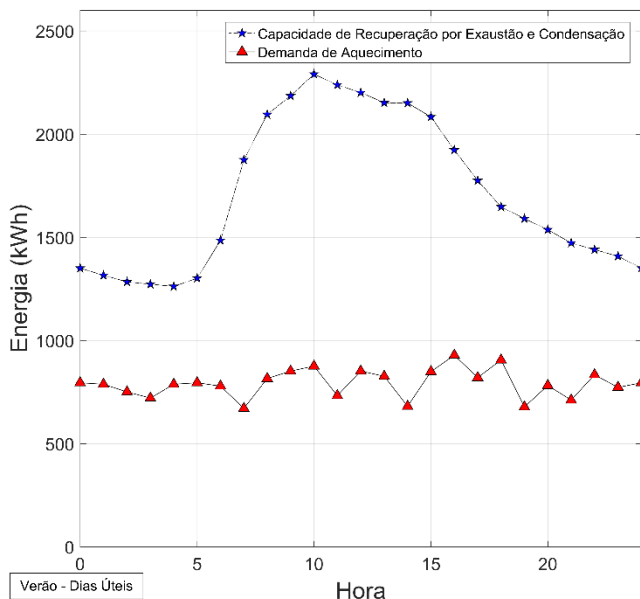


Figura 6.16: *Uso da Termoacumulação Fria na Terceira Arquitetura na Primavera – Dias Não Úteis*

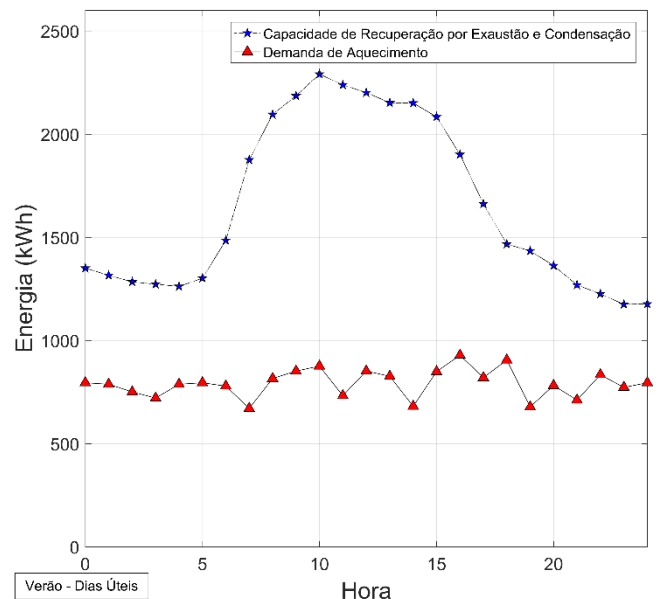
O destaque da Figura 6.16 é a demonstração do potencial de uso da Termoacumulação Fria dos dias úteis de Primavera, demonstrado na Figura 6.15. Será visto à frente que o principal ganho na implementação da terceira arquitetura reside na Primavera.

6.1.3 Capacidade de Termoacumulação Quente

Similarmente à Termoacumulação Fria, foi estudada a Termoacumulação Quente e sua viabilidade. Portanto, serão comparadas as curvas de capacidade de recuperação do calor útil da geração e condensação; E a demanda de aquecimento para identificar se há espaço para termoacumulação.



(a)

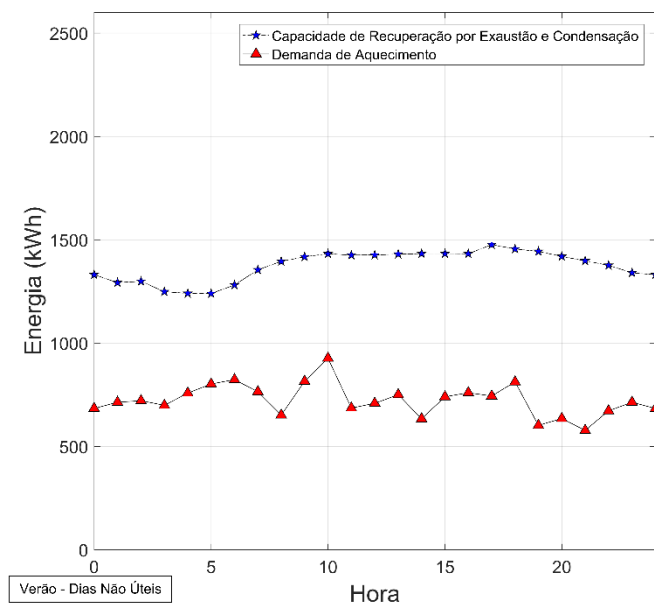


(b)

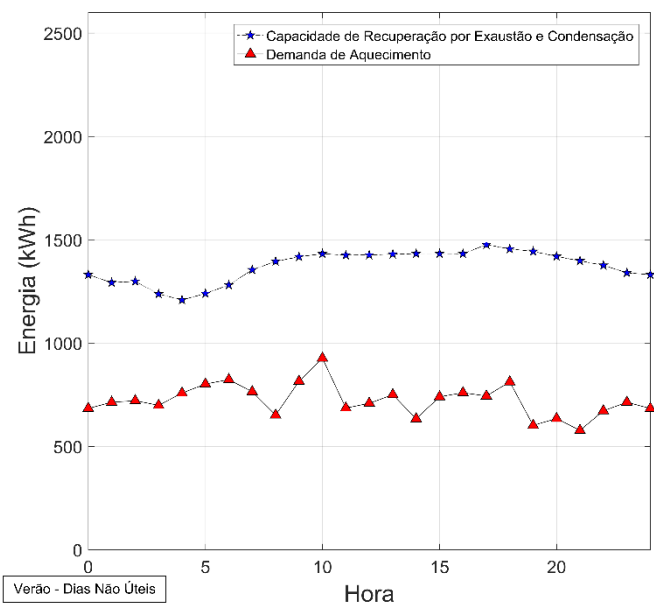
Figura 6.17: Capacidade de Termoacumulação Quente para Verão, Dias Úteis na:
(a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

Os gráficos acima ilustram um padrão muito distinto dos gráficos de capacidade de termoacumulação fria. Apesar de parecerem que seriam um caso particular por estarem em uma estação quente, em seguida ficará claro que todas estações possuem o mesmo perfil: a termoacumulação quente sempre ocorre, e portanto nunca é necessitada.

Primeiramente, deve-se notar que o ponto está deslocado para baixo na segunda arquitetura, ou seja, o potencial de recuperação para refrigeração é menor. Pelo modelo matemático, sabemos que o potencial de recuperação é diretamente proporcional à potência total do motor térmico, o que significa que está sendo consumida menos energia na terceira arquitetura.

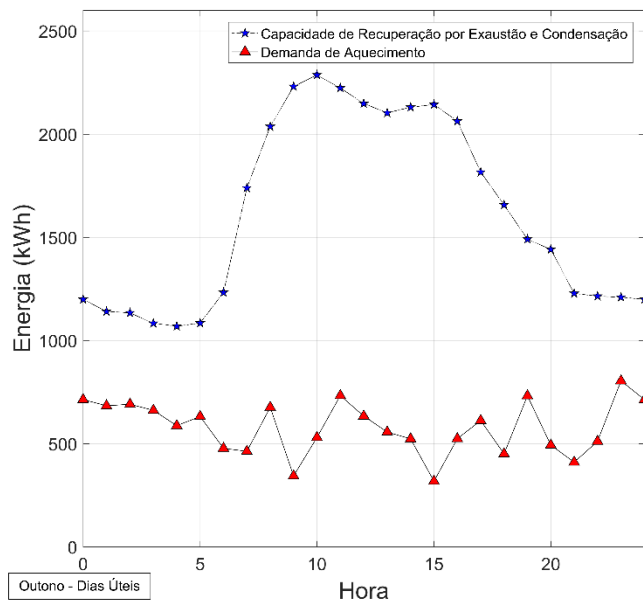


(a)

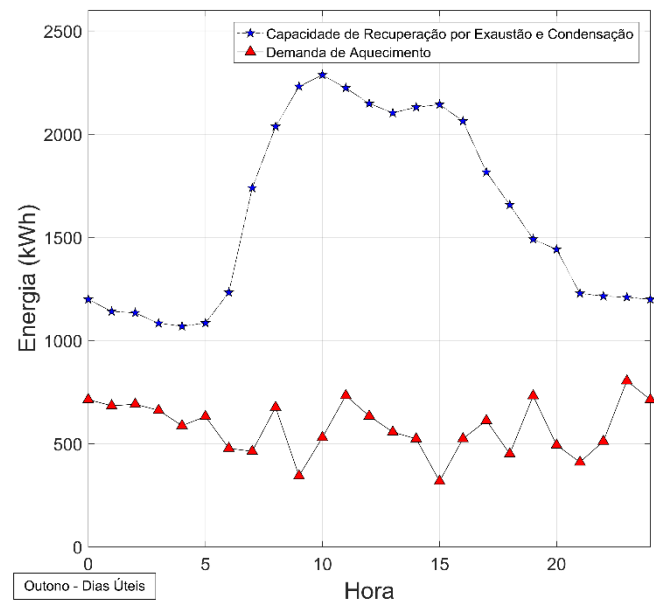


(b)

Figura 6.18: Capacidade de Termoacumulação Quente para Verão, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

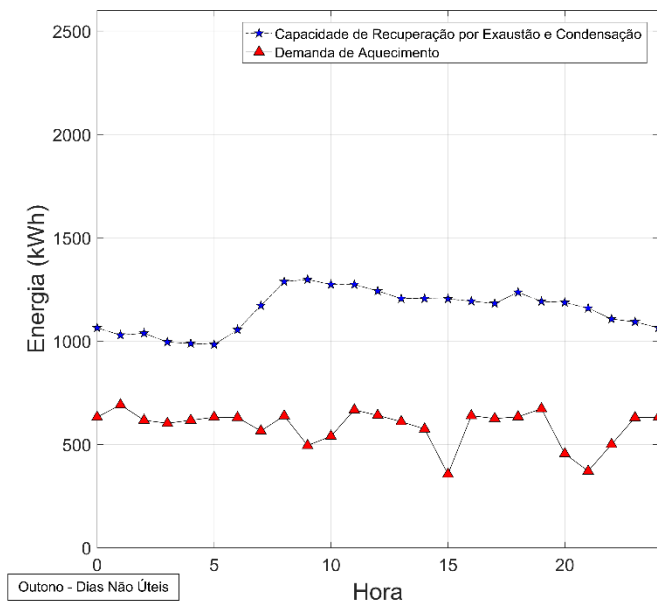


(a)

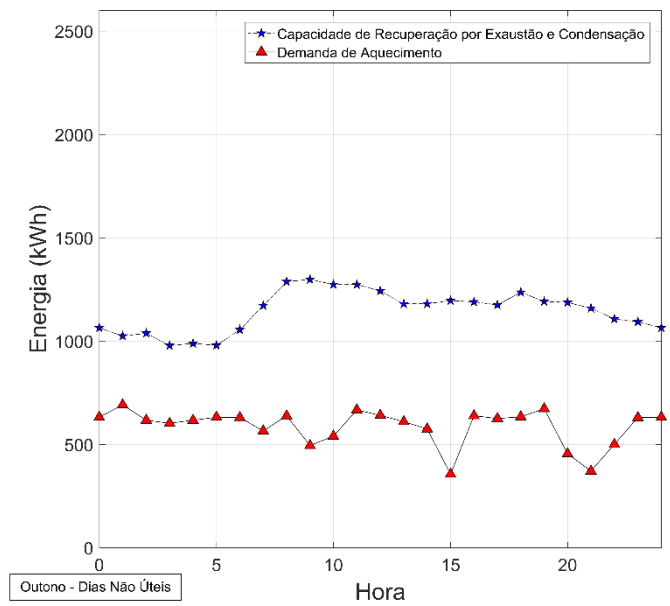


(b)

Figura 6.19: Capacidade de Termoacumulação Quente para Outono, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

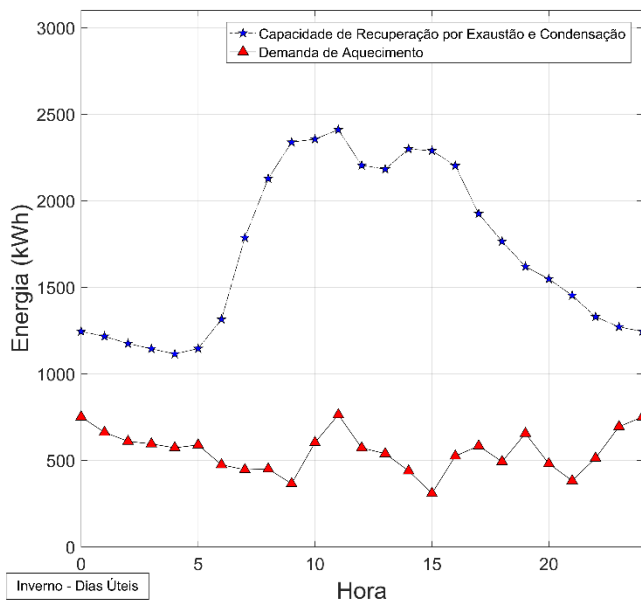


(a)

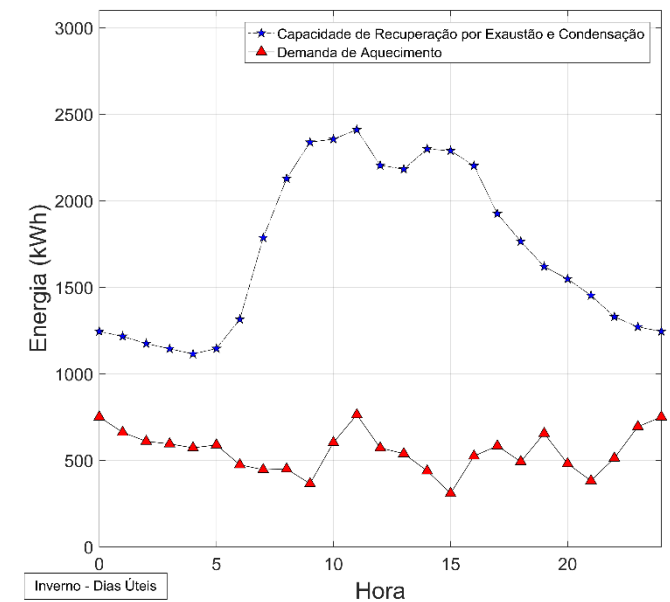


(b)

Figura 6.20: Capacidade de Termoacumulação Quente para Outono, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

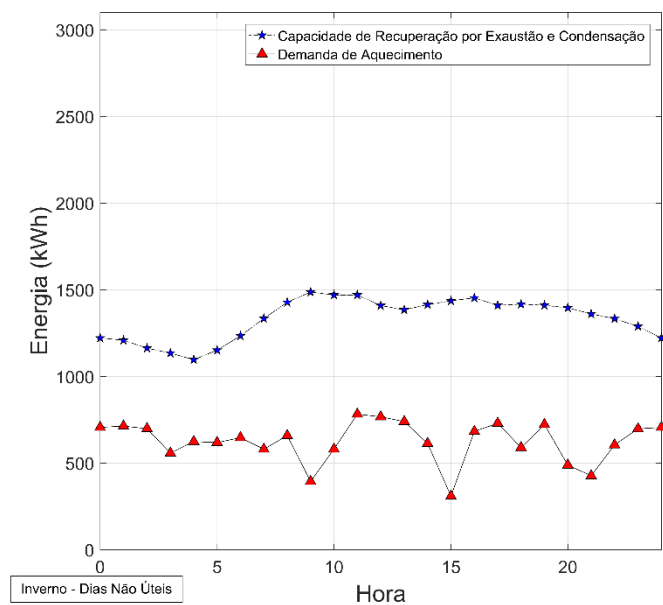


(a)

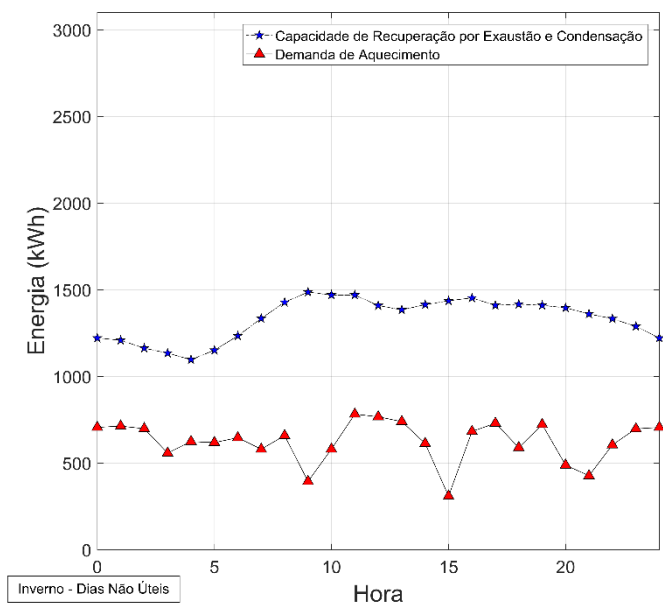


(b)

Figura 6.21: Capacidade de Termoacumulação Quente para Inverno, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

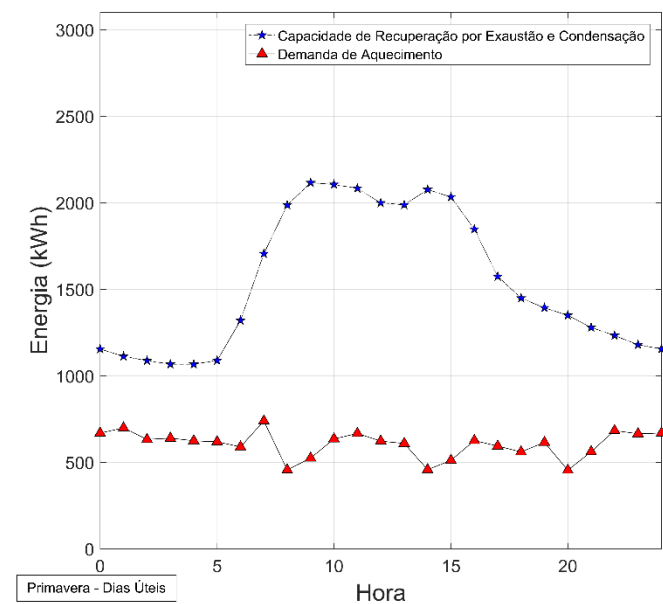


(a)

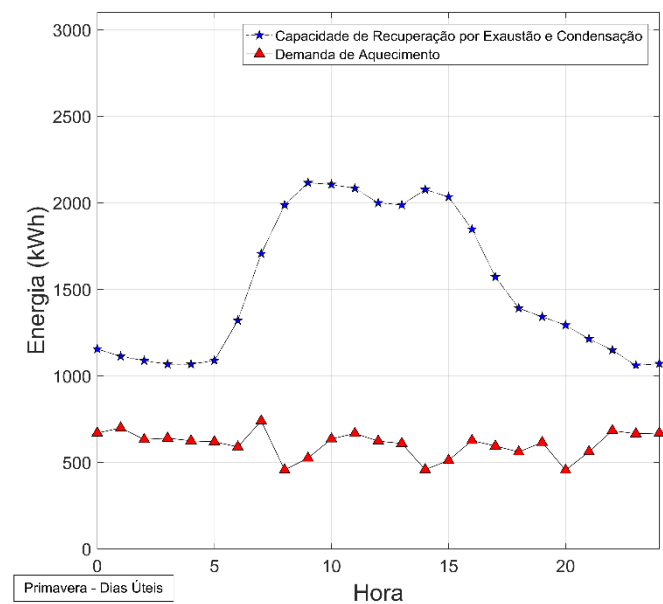


(b)

Figura 6.22: Capacidade de Termoacumulação Quente para Inverno, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

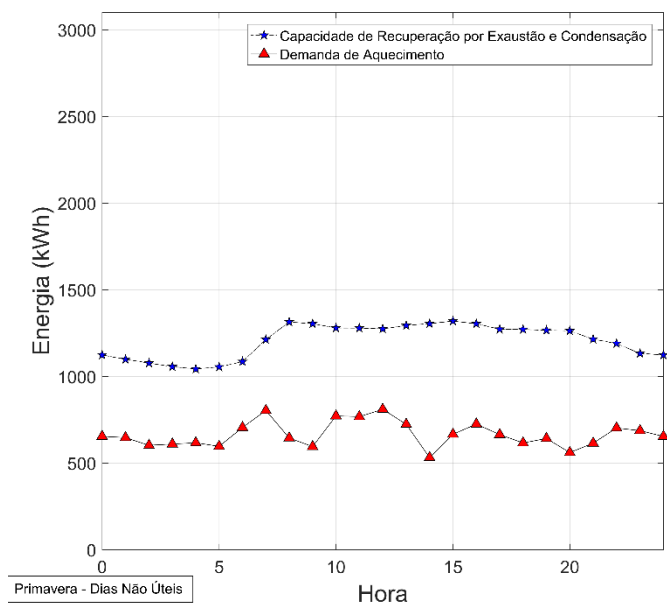


(a)

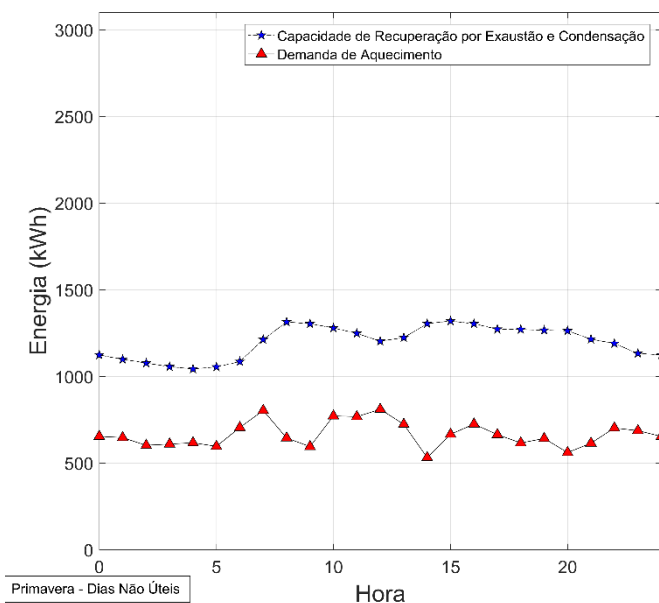


(b)

Figura 6.23: Capacidade de Termoacumulação Quente para Primavera, Dias Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.



(a)

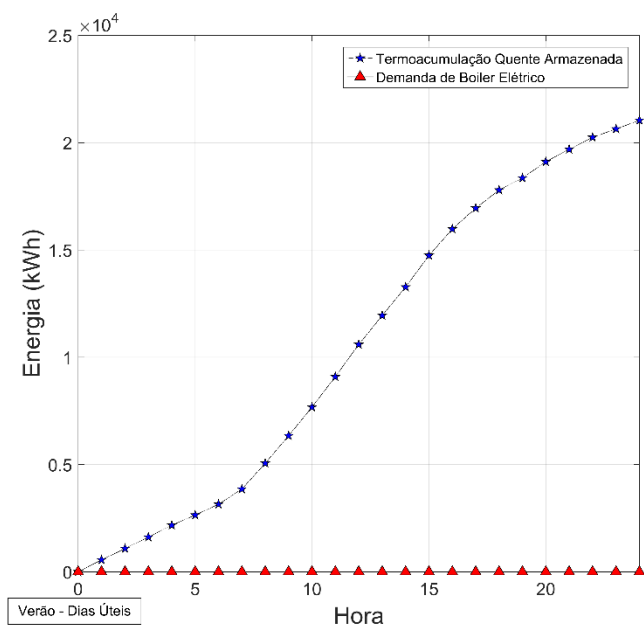


(b)

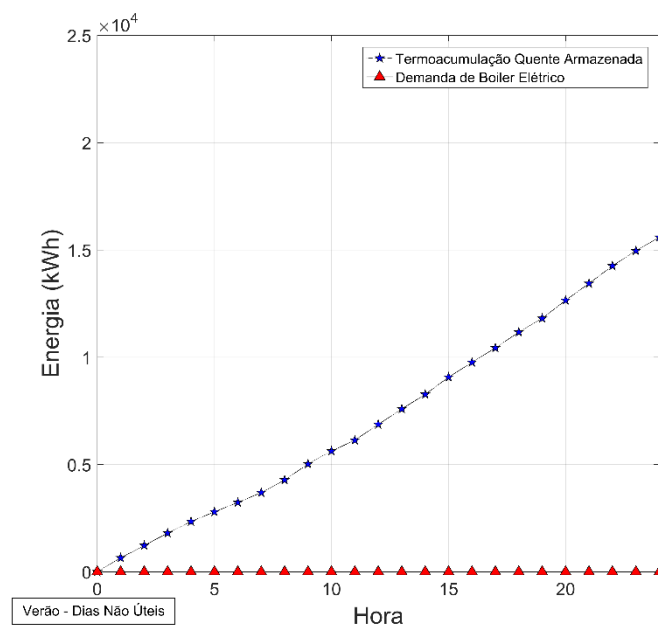
Figura 6.24: Capacidade de Termoacumulação Quente para Primavera, Dias Não Úteis na: (a) Segunda e (b) Terceira Arquitetura.

6.1.4 Uso da Termoacumulação Quente

Conforme afirmado na subseção 6.1.3 Capacidade de Termoacumulação Quente, exposto também pelos gráficos desta subseção, não há uso para a Termoacumulação Quente para este conjunto de dados, tornando-a oficialmente redundante. Este evento será reiterado nas Figuras 6.25 a 6.28, que descrevem o volume armazenado do tanque termoacumulação quente frente ao uso do Boiler Elétrico. Será visto que o Boiler Elétrico será nulo em todos momentos, e o volume de energia armazenado no tanque será estritamente crescente.

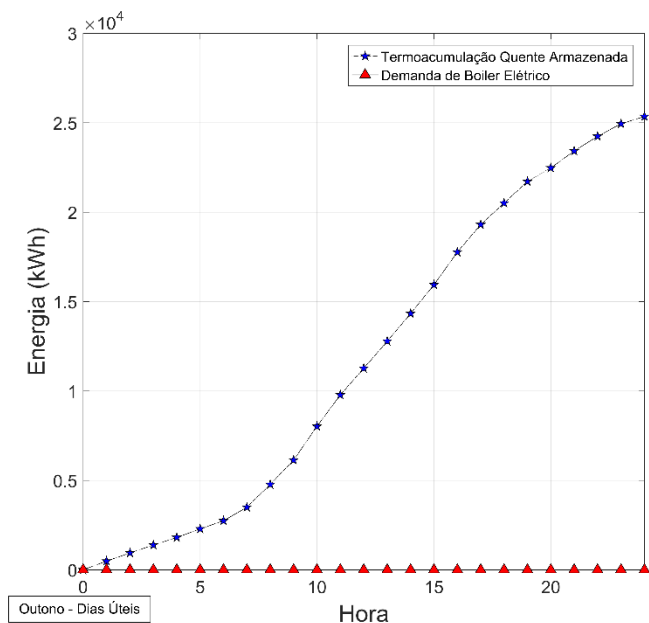


(a)

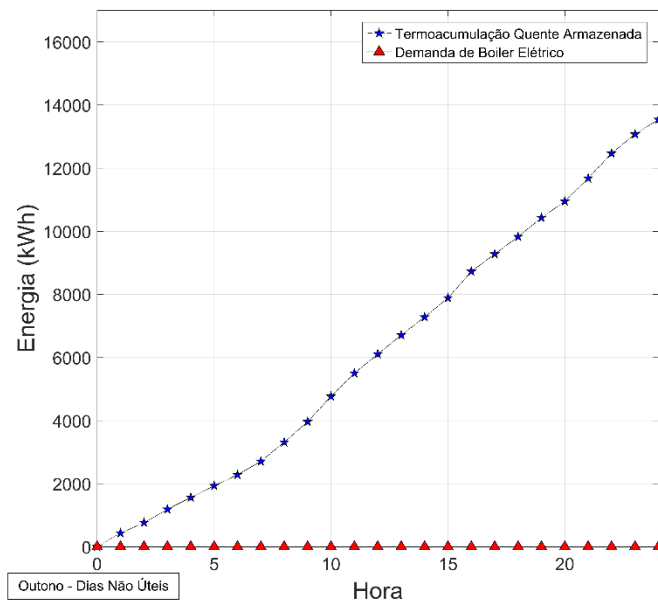


(b)

Figura 6.25: Uso da Termoacumulação Quente para Verão em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.

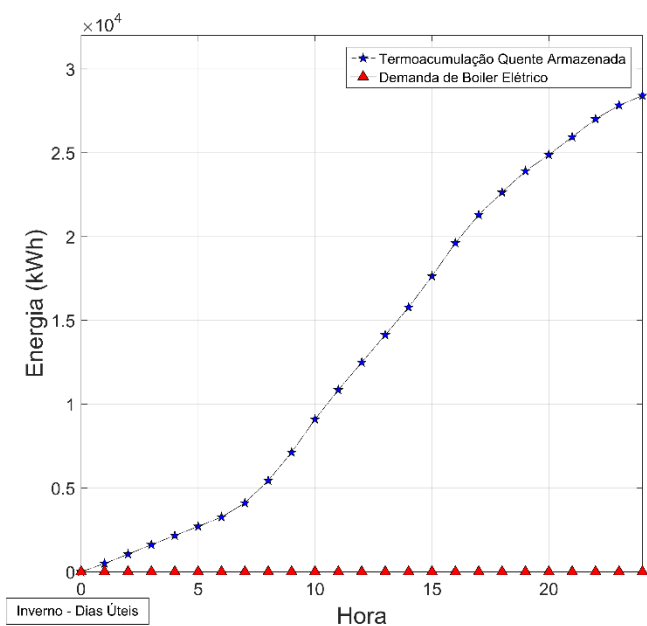


(a)

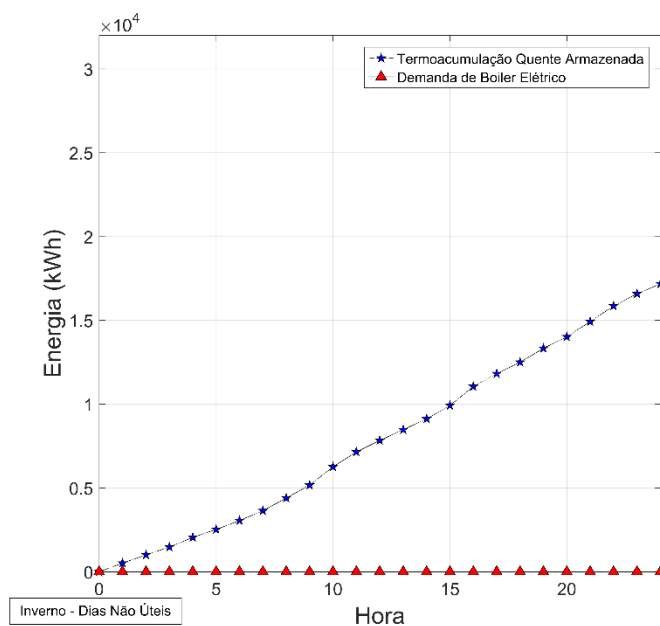


(b)

Figura 6.26: Uso da Termoacumulação Quente para Outono em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.

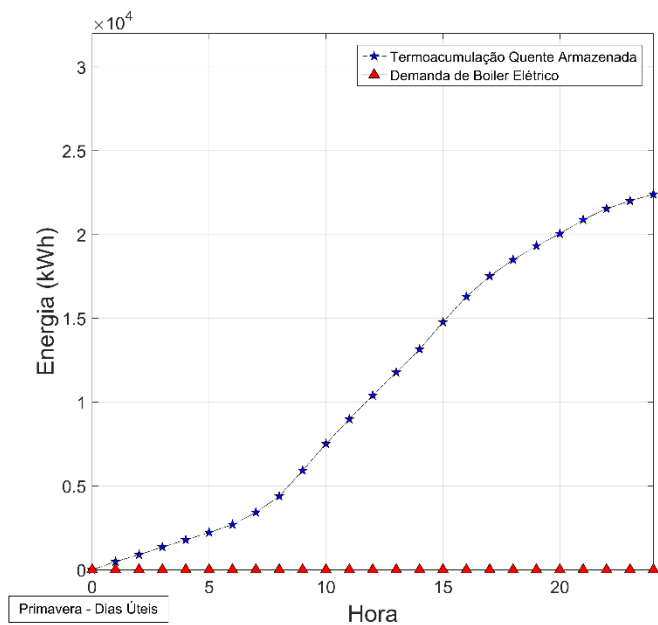


(a)

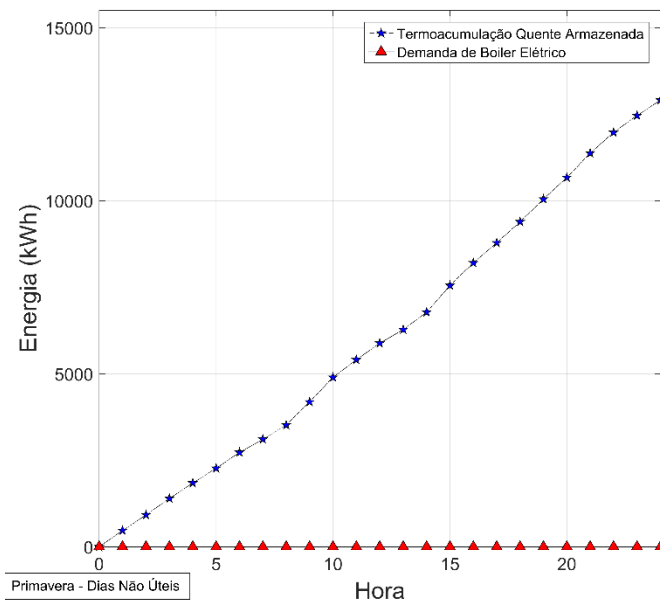


(b)

Figura 6.27: Uso da Termoacumulação Quente para Inverno em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.



(a)



(b)

Figura 6.28: Uso da Termoacumulação Quente para Primavera em: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis.

6.1.5 Total de Energia Consumida

Esta subseção visa dar forma e valor à existência e à economia da implementação da segunda e terceira arquitetura. Serão exibidas as Figuras 6.49 a 6.56, que preservam os eixos utilizados anteriormente, porém desta vez com três curvas relativas ao consumo total (trabalho do motor) das três arquiteturas para o atendimento das demandas operacionais.

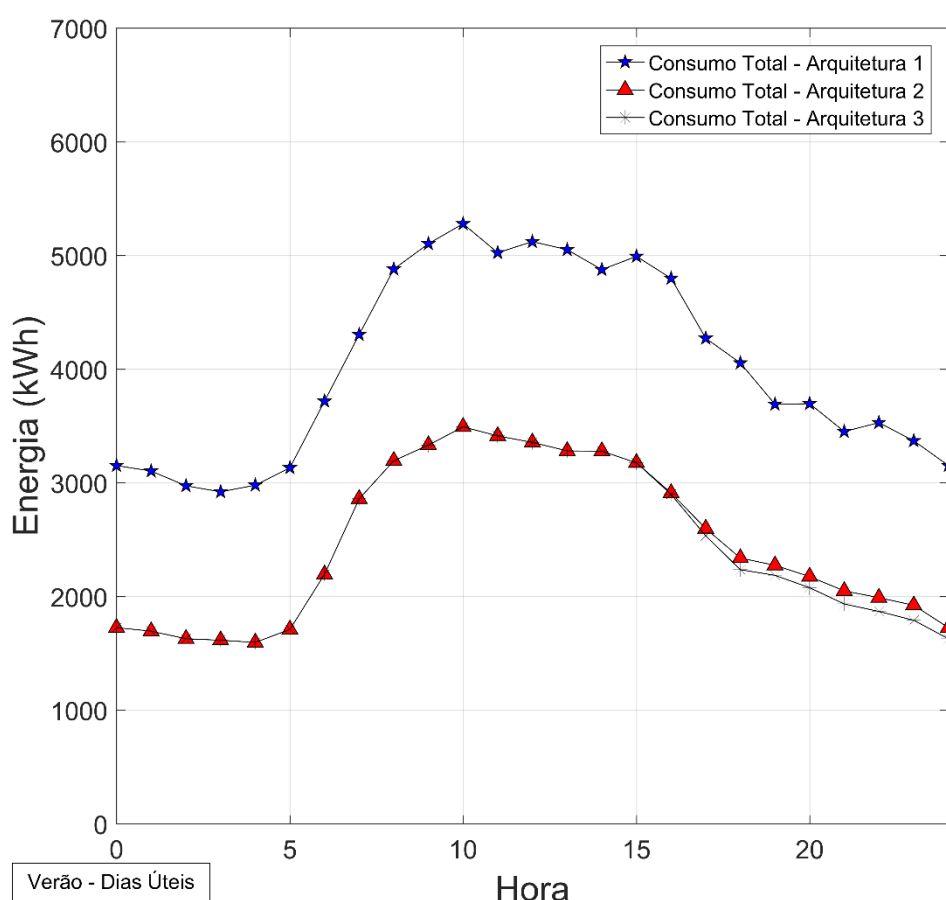


Figura 6.29: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Verão– Dias Úteis

O ponto principal da Figura 6.29 é demonstrar o imenso ganho de energia elétrica usufruído pelo hospital uma vez que a trigeriação for implementada. Adicionalmente, há uma notável economia de energia entre a terceira e segunda arquitetura, usufruída pelo hospital nas horas finais do dia durante o uso do tanque previamente termoacumulado.

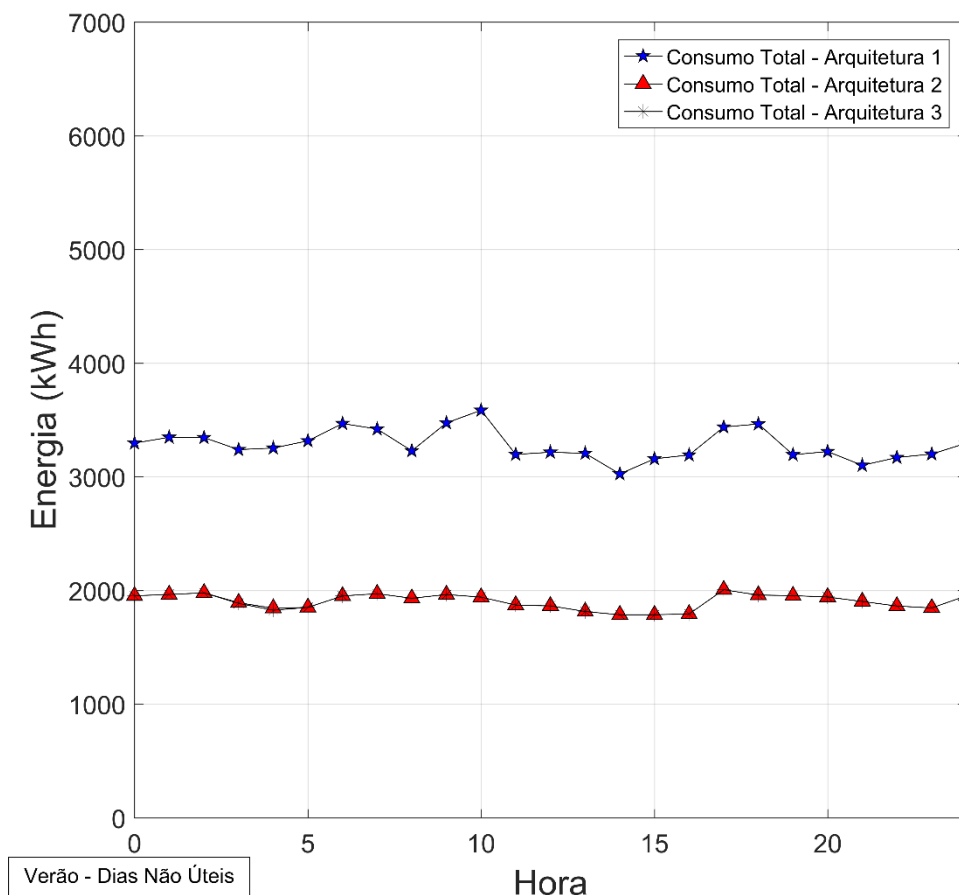


Figura 6.30: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Verão– Dias Não Úteis

Similarmente à Figura 6.30, todas figuras desta subseção apresentarão ganhos claros na implementação da segunda e terceira arquitetura frente a primeira, redução de energia na ordem de 35%.

Porém, diferentemente da Figura 6.29, os dias não úteis de Verão praticamente não apresentam necessidade do uso de termoacumulação, que em breve será visto como o ganho total entre as duas últimas arquiteturas.

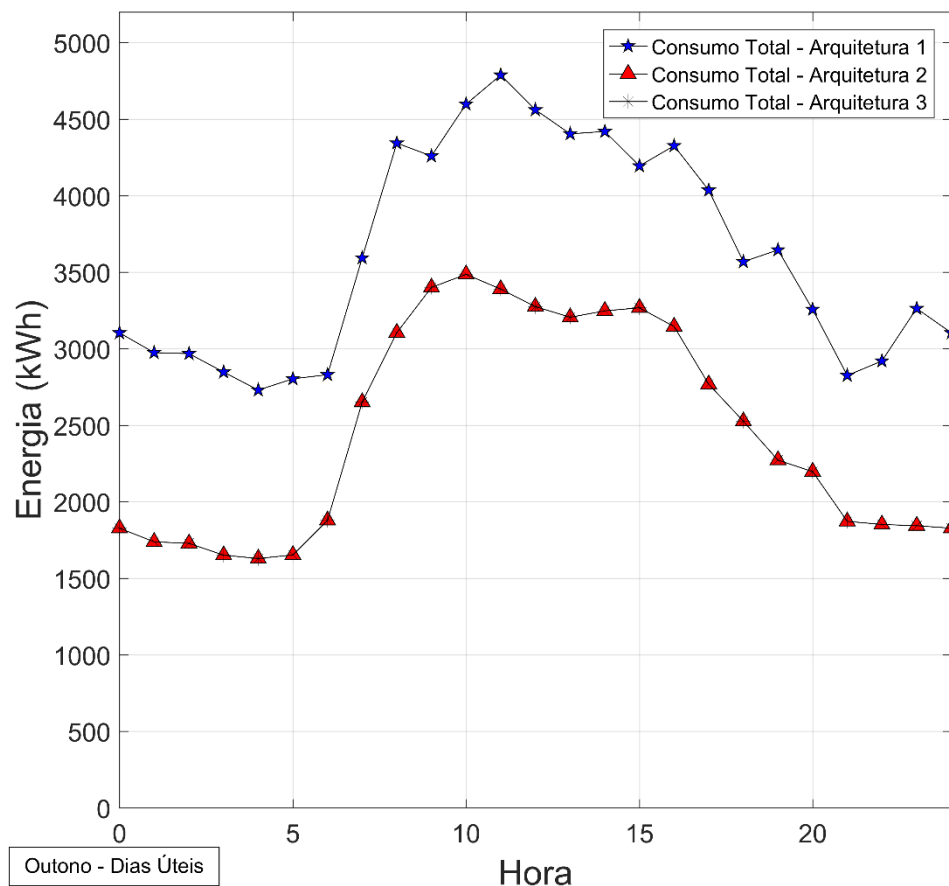


Figura 6.31: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Outono – Dias Úteis

Similarmente à Figura 6.30 e conforme Figura 6.11, todos pontos dos dias úteis de Outono não usufruem da termoacumulação, sendo então inexistentes os ganhos da implementação da terceira arquitetura frente à segunda arquitetura. Porém, o ganho na implementação da trigeração persiste.

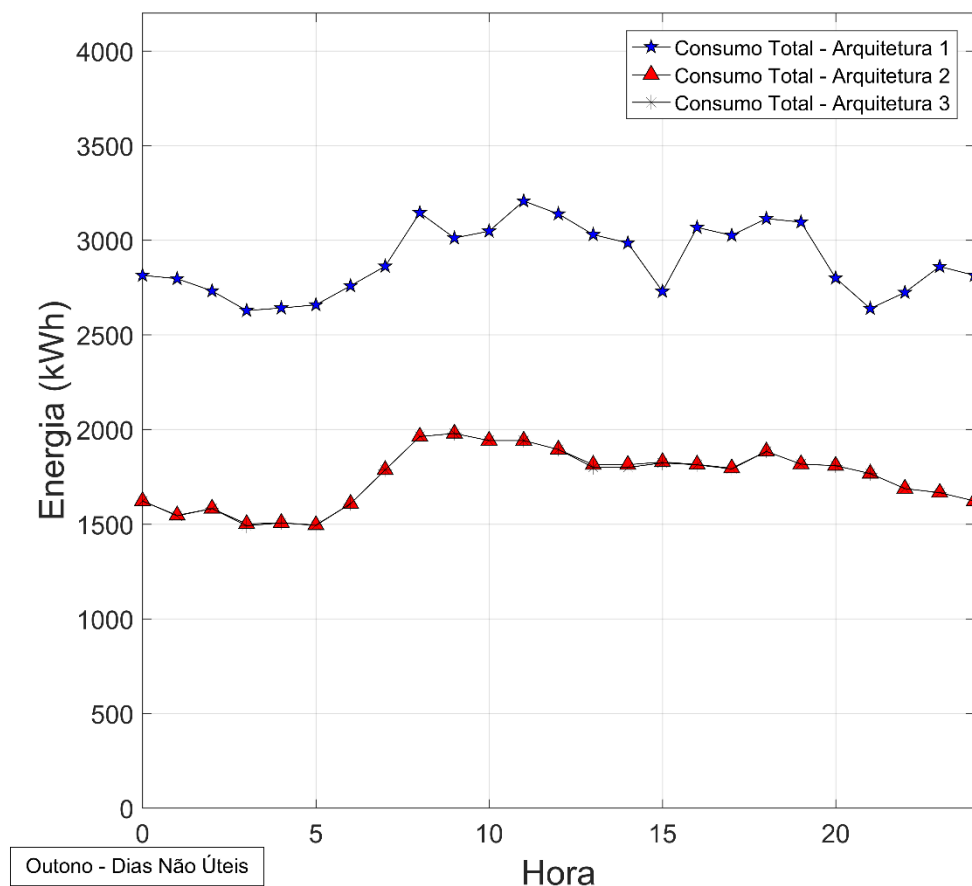
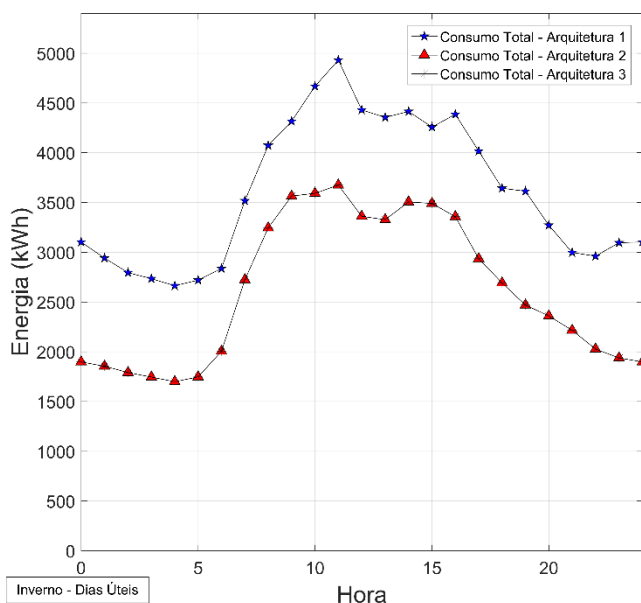
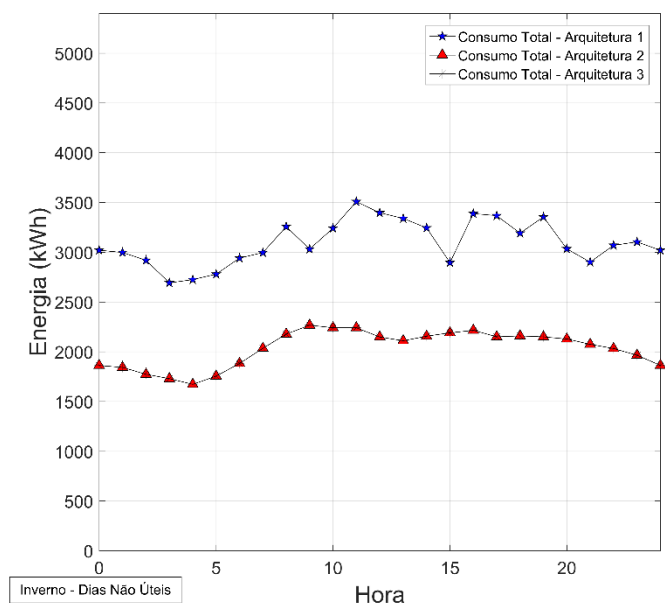


Figura 6.32: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Outono – Dias Não Úteis

A Figura 6.32 se distingue dos moldes da Figura 6.31, havendo pequena redução do total de energia entre arquiteturas dois e três, pouco perceptível nas horas 13 e 14, porém persistindo o ganho da implementação da segunda arquitetura frente à primeira.



(a)



(b)

Figura 6.33: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas no Inverno para: (a) Dias Úteis e (b) Dias Não Úteis

As Figuras 6.33 (a) e (b), correspondentes ao Inverno, seguem a mesma configuração da Figura 6.31: não há uso para a termoacumulação fria, porém a trigeriação continua sendo imensamente positiva na economia.

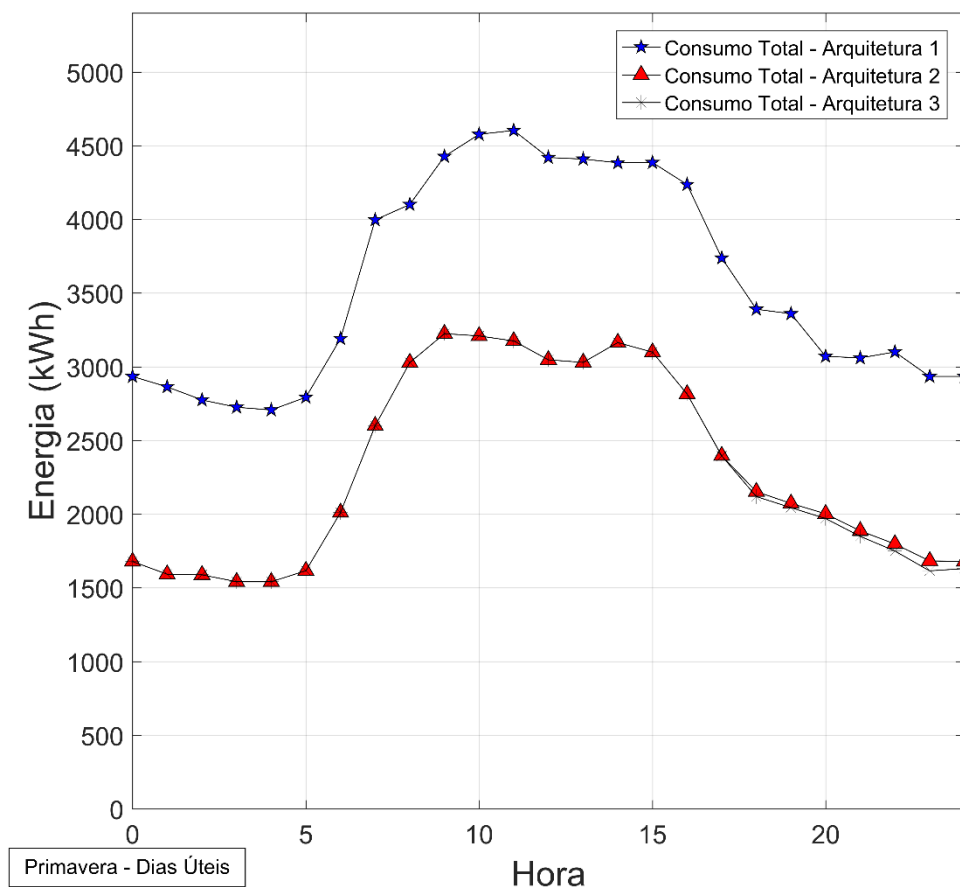


Figura 6.34: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas na Primavera – Dias Úteis

A Figura 6.35 retorna aos ganhos observáveis da termoacumulação da Figura 6.29, onde há uma clara distinção no total de energia consumida entre as arquiteturas dois e três, ocorrendo ao final do dia, após a termoacumulação.

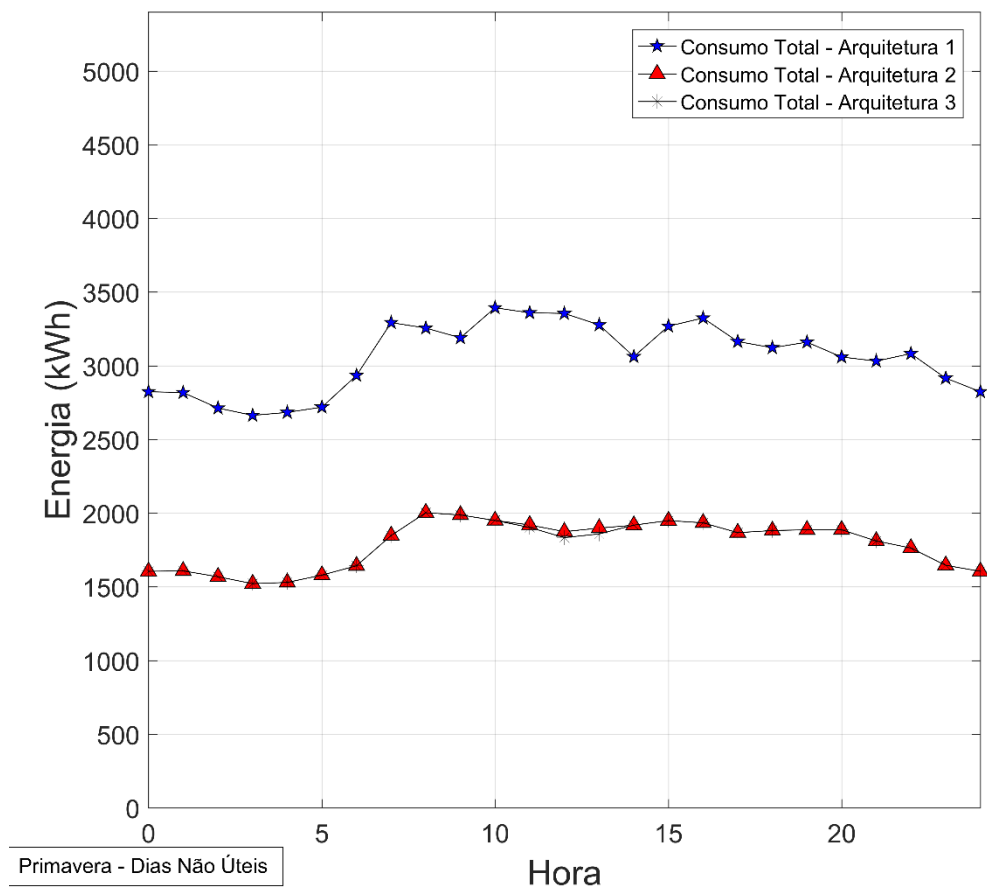


Figura 6.35: Comparação entre totais de energia consumida entre Arquiteturas na Primavera – Dias Não Úteis

Os dias não úteis de Primavera também usufruem da termoacumulação fria, cujo benefício é destacado nas horas centrais do dia. Assim como todos outros casos, a economia de energia gerada pela implementação da Trigeração é notável.

6.2 Resultados do Nono Conjunto de Dados: Ano Inteiro

Conforme esclarecido no início da seção seis (6), foi criado um nono conjunto de dados a partir dos dois conjuntos apresentados acima. O nono conjunto é o período de um ano, composto pelas quatro (4) estações, cada uma com treze (13) semanas, compostas por sete (7) dias, dois (2) úteis e cinco (5) não úteis, totalizando 364 dias em um ano – uma simplificação facilmente incorporável.

6.2.1 Pré-Análise do Ano

Apesar de o objetivo final deste trabalho ser calcular os benefícios decorrentes da implementação da segunda e terceira arquitetura no sistema atual do Hospital, a previsão dos resultados a serem demonstrados na seção de resultados seguinte será a mera consequência dos comportamentos demonstrados nas Figuras 6.1 a 6.56, dado que o ano é construído apenas por dias iguais aos analisados anteriormente.

Portanto, destacam-se alguns pontos que serão relevantes ao melhor entendimento da seção 6.2.2, estes já analisados e levantados na seção 6.1:

- Em todos casos a capacidade de aquecimento através de recuperação superou a demanda de aquecimento, isto é, não houve uso tanto para o Boiler Elétrico quanto o Tanque de Termoacumulação Quente (Figuras 6.25 a 6.48).
- Para todos casos, a implementação da Trigeração foi extremamente benéfica, cuja economia de energia gerada será numericamente vista à frente (Figuras 6.49 a 6.56).
- Os maiores ganhos de economia mediante a implementação da Termoacumulação ocorrem no Verão e Primavera; há pequenos ganhos no Outono e nenhum ganho no Inverno (Figuras 6.1 a 6.24).

6.2.2 Dimensionamento do Tanque de Termoacumulação Fria

Dimensionar o Tanque de Termoacumulação Fria é determinar qual é sua quantia máxima de energia armazenável, independentemente do meio de armazenamento.

Tendo essa definição em mente, para melhor entender o dimensionamento do tanque primeiro devemos recorrer às Figuras 6.9 a 6.16, que demonstram o uso do tanque de termoacumulação fria. Através delas, percebemos os seguintes fatos:

- Durante o Verão, nos dias úteis, o tanque é carregado até aproximadamente 1.250kWh, energia que é descarregada até o final do dia. Isto é, utiliza tudo que carrega. O mesmo ocorre para os dias não úteis, nos quais o pico de carregamento foi 40kWh.
- Durante o Outono, nos dias úteis, o tanque tem um potencial de carregamento de até 5.200kWh até o final do dia, nunca utilizando o tanque. Já nos dias não úteis, o tanque possui um potencial de carregamento de 600kWh até o final do dia, porém utiliza por volta de 20kWh de Chiller Elétrico, quantia que pode facilmente ser tratada através da termoacumulação fria dos dias úteis desta estação.
- Durante o Inverno, tanto nos dias úteis quanto não úteis não houve descarregamento do tanque de termoacumulação, com potenciais de carregamento de 10.200kWh 6.400kWh, respectivamente.
- Durante a Primavera, nos dias úteis, percebe-se o potencial de uso anterior do tanque em aproximadamente 300kWh (devido ao uso de Chiller Elétrico), porém sua energia armazenada até o final do dia é de aproximadamente 1800kWh, portanto, seu armazenamento líquido por dia seria de 1500kWh. Já nos dias não úteis há um consumo de Chiller Elétrico de aproximadamente 800kWh, e um pico de carregamento de 145kWh, porém consumindo toda esta carga.

Portanto, partimos para análise da energia total armazenada no tanque ao longo do ano na Figura 6.36, na qual não houve dimensionamento do tanque, isto é, está ausente a restrição da capacidade máxima de energia armazenada.

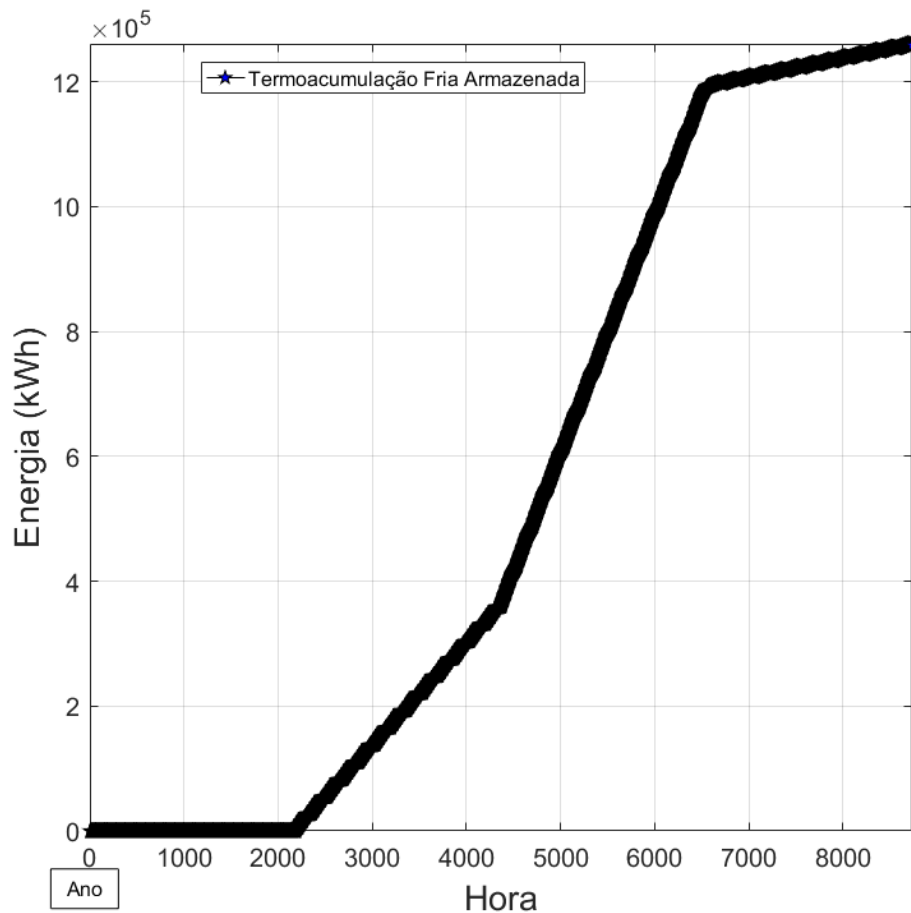


Figura 6.36: Termoacumulação Fria Armazenada durante o Ano, sem restrições

Por meio do gráfico acima e da análise feita anteriormente, sabemos que o Dimensionamento do Tanque de Termoacumulação Fria será equivalente à maior descarga do tanque. Sendo assim, a descarga referida ocorre nos dias não úteis de primavera, nos quais o tanque utiliza a energia acumulada durante os dias úteis, poupando o uso de 2529,1 kWh. Isto é, a capacidade máxima de Termoacumulação Fria Armazenada deverá ser de aproximadamente 2550 kWh.

É importante realçar que a energia consumida nos dias não úteis de Primavera é inferior à capacidade de termoacumulação dos dias úteis, fato demonstrado pelo energia armazenada crescente durante a primavera na Figura 6.37, que é oriunda de um zoom aplicado em uma semana típica de Primavera da Figura 6.36. Os primeiros cinco ciclos observáveis no gráfico correspondem aos cinco dias úteis da

semana, os dois ciclos seguinte são dias não úteis, seguidos por quase três ciclos de dias úteis (representando continuidade).

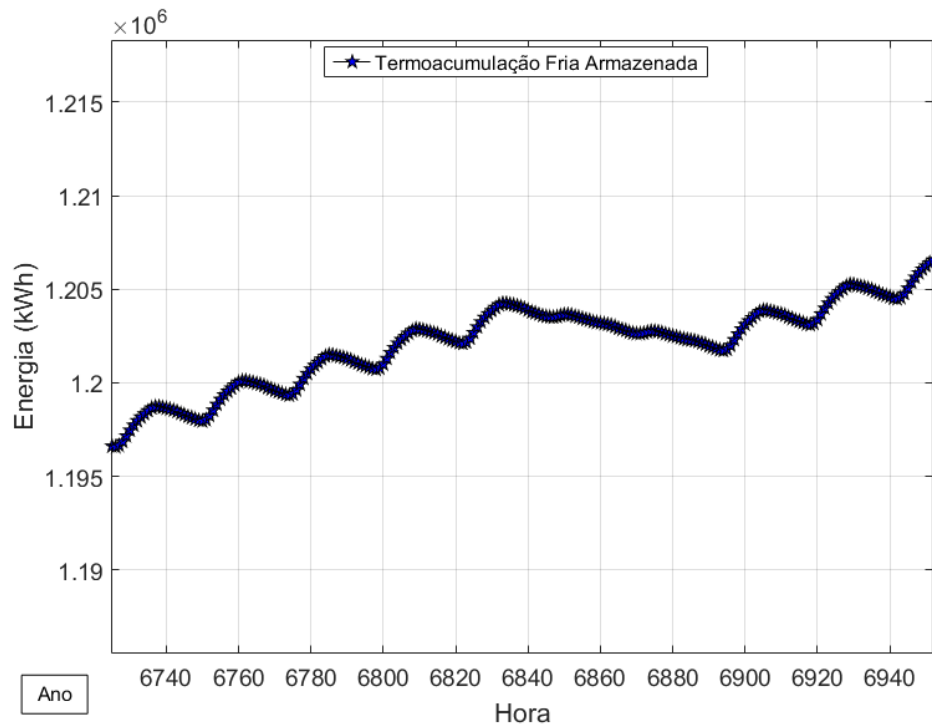


Figura 6.37: Termoacumulação Fria Armazenada durante uma semana típica de Primavera, sem restrições

6.2.3 Economia Gerada com as Arquiteturas

O resultado principal deste trabalho é justamente apresentar a economia gerada através da implementação das arquiteturas, que é apresentada na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Economia Gerada com as Arquiteturas

Arquitetura	Consumo de Energia Anual (kWh)	Economia frente à 1ª Arquitetura (kWh)	Redução (%)	Economia frente à 2ª Arquitetura (kWh)	Redução (%)
Arquitetura 1	3.1297.733,03	-	-	-	-
Arquitetura 2	2.0403.702,22	1.089.4030,8	34,808%	-	-
Arquitetura 3	2.0349.535,56	1.0948.197,47	34,981%	54.166,67	0,265%

Os dados da Tabela 6.1 foram retirados através das simulações de todas as três arquiteturas no código MATLAB, referentes à energia consumida pelo Motor Térmico, demonstrado nas Figuras 5.1 a 5.3.

6.2.4 Proposição da 4ª Arquitetura – Trigeração com Termoacumulação Fria

Em virtude da inutilização do Boiler Elétrico, dado que nunca foi acionado na segunda ou terceira arquitetura, nunca havendo então uso para a Termoacumulação Quente na terceira arquitetura, foi criada a quarta arquitetura, equivalente à terceira, inclusive em resultados, porém sem componentes supérfluos.

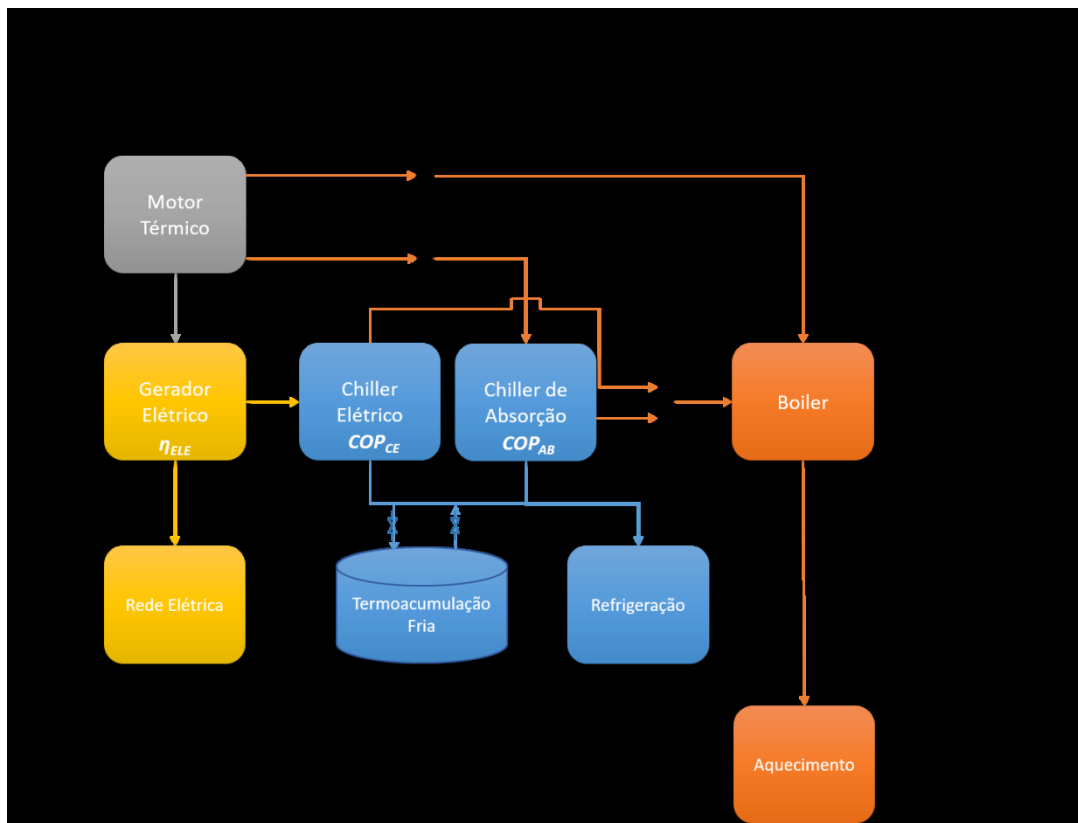


Figura 6.38: Quarta Arquitetura – Trigeração com Termoacumulação Fria

7 Conclusão

Partindo de um estudo de caso do Hospital Universitário da UNICAMP [3], foram desenvolvidas três estruturas de consumo e geração, aqui denominada arquiteturas. Estas arquiteturas são: a estrutura atual do Hospital; a estrutura original com a implementação de cogeração na forma de trigeração; e a estrutura anterior complementada pela termoacumulação. Seus objetivos são representar o status quo do hospital e dois modelos aprimorados, visando economia no consumo de energia ao longo do ano, a qual foi calculada através de um modelo matemático.

O modelo matemático tem como princípio a 1ª lei da Termodinâmica, auxiliado pelas esquemáticas das arquiteturas, capazes de demonstrar o fluxo de energia. Através deste modelo, foi desenvolvido um código em MATLAB que recebe como entrada os dados das demandas operacionais do Hospital de eletricidade, refrigeração e aquecimento e como saída retorna dados sobre o consumo energético dos componentes das arquiteturas, demonstrados também graficamente. O modelo utiliza sempre o método mais eficiente de consumo através de um processo de autodecisão orientado à minimização do consumo energético total.

Mediante análise dos dados gerados pelo código, foi possível determinar: a economia de energia gerada pela implementação da segunda ou terceira arquitetura proposta; o dimensionamento dos tanques de termoacumulação fria e quente; a criação de uma quarta arquitetura, equivalente à terceira porém sem componentes supérfluos, cuja identificação só foi possível após a análise dos resultados.

Com os resultados supracitados, foi possível constatar que a terceira arquitetura é a mais promissora para o fim proposto. Porém, sua economia gerada é pouco maior que a da segunda arquitetura, mostrando que o ganho gerado pela implementação da termoacumulação foi baixa, ainda que considerável. Entretanto, ambas arquiteturas geraram economias de energia altamente positivas, reduzindo o consumo total em aproximadamente 35%.

8 Referências Bibliográficas

[1] Chisholm, Hugh, ed. (1911). "Faraday, Michael". *Encyclopædia Britannica*. 10 (11th ed.). Cambridge University Press. pp. 173–175. the 1911 *Encyclopædia Britannica*.

[2] "Public Utility Regulatory Policy Act (PURPA)". Union of Concerned Scientists. Retrieved 12 Apr 2014.

LANES, F. P., PARISE, J.A.R., XXIII Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica da PUC-Rio, "Estudo de Diferentes Arquiteturas para Sistemas de Trigeração Aplicados ao Hospital de Clínicas da Unicamp", Rio de Janeiro, 2015.

AL-SULAIMAN, F. A. , HAMDULLAHPUR, F. , DINCER, I., Trigeneration: A comprehensive review based on prime movers, *International Journal of Energy Research*, Volume 35, Issue 3, pages 233–258, 10 March 2011.

ASHRAE, *ASHRAE Handbook—HVAC Applications*, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta, 2000 (Chapter 7).

[3] DO ESPIRITO SANTO, D.B. An energy and exergy analysis of a high-efficiency engine trigeneration system for a hospital: A case study methodology based on annual energy demand profiles, Rio de Janeiro, Janeiro 2014.