



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PLANTAS DE MICROCOGERAÇÃO COM A
UTILIZAÇÃO DE UM MÓDULO DE CONFIGURAÇÃO DE TAREFAS PARA A
TOMADA DE DECISÃO EM DEMANDAS VARIÁVEIS.**

**DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PARA OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**AUTOR: Nazario Rodolfo De Melo
ORIENTADOR: Fabio Santana Magnan
CO-ORIENTADOR: José Carlos Charamba Dutra**

Recife, Julho de 2004

Melo, Nazario Rodolfo de
Simulação e otimização de plantas de
microcogeração com a utilização de um módulo de
configuração de tarefas para a tomada de decisão em
demandas variáveis / Nazario Rodolfo de Melo. –
Recife : O Autor, 2004.
viii, 141 folhas : il., fig., tab.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de
Pernambuco. CTG. Engenharia Mecânica, 2004.

Inclui bibliografia e anexo.

1. Sistemas térmicos – Simulação e otimização. 2.
Microcogeração (Sistemas térmicos) – Otimização de
plantas (Máquinas térmicas). 3. Máquinas térmicas –
Otimização – Formas de operação. I.Título.

621.4
621.4

CDU (2ed.)
CDD (21.ed.)

UFPE
BC2004-503

"SIMULAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DE PLANTAS DE MICROCOGERAÇÃO COM A UTILIZAÇÃO DE UM MÓDULO DE CONFIGURAÇÃO DE TAREFAS PARA A TOMADA DE DECISÃO EM DEMANDAS VARIÁVEIS".

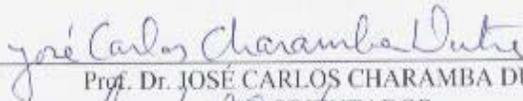
NAZÁRIO RODOLFO DE MELO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

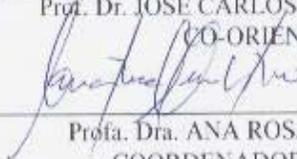
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROCESSOS E SISTEMAS TÉRMICOS
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA/CTG/EEP/UFPE



Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI
ORIENTADOR/PRESIDENTE

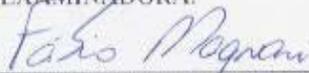


Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA
CO-ORIENTADOR



Profa. Dra. ANA ROSA MENDES PRIMO
COORDENADORA DO CURSO

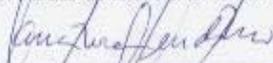
BANCA EXAMINADORA:



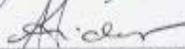
Prof. Dr. FÁBIO SANTANA MAGNANI (UFPE)



Prof. Dr. JOSÉ CARLOS CHARAMBA DUTRA (UFPE)



Prof. Dr. ANA ROSA MENDES PRIMO (UFPE)



Prof. Dr. PAULO SMITH SCHNEIDER (UFRGS)

DEDICATÓRIA

A todas as pessoas que contribuíram diretamente para o meu desenvolvimento e formação como ser humano e como profissional.

AGRADECIMENTOS

A Deus que me carrega nos braços nos momentos mais difíceis, os quais, com certeza, não conseguiria seguir em frente.

À minha esposa Juliane por me acompanhar e apoiar em momentos bastante difíceis nesta etapa de minha formação.

À minha família que me ajudou compartilhando minhas alegrias e minhas tristezas durante toda a minha formação.

À UFPE, em especial ao Depto. de Engenharia Mecânica, pelas oportunidades oferecidas durante minha graduação e pós-graduação.

Ao professor Fábio Santana Magnani, pela orientação, apoio e incentivo na realização deste trabalho.

Ao professor José Carlos Charamba Dutra, pelo convite para participar do GET e do projeto COGENCASA.

Aos professores Jorge Henríquez e Ana Rosa pelo, a Pedro Anselmo, Jacek Michalewicz, Augusto André e Érico Saturnino pelo apoio recebido.

Aos companheiros de mestrado Malvino André e Ravi Ramalho pela amizade acima de tudo, que nos uniu na solução de problemas até nos finais de semana.

Ao Newton Reis de Moura, da Petrobrás, pelo apoio administrativo, sugestões técnicas, incentivo e grande apoio no teste do aplicativo "cogera" efetuado no CENPES.

Ao Michel Fabianski Campos, da Petrobrás, pelo apoio administrativo junto ao projeto COGENCASA.

À CAPES, PETROBRÁS, COPERGAS e FINEPE pelo suporte financeiro durante o período de realização deste trabalho.

RESUMO

Modificações no cenário do setor elétrico brasileiro têm incentivado novos estudos em geração distribuída. Com a ocorrência de uma maior oferta de combustível, proporcionada por medidas estratégicas do governo, diversos grupos de pesquisa se focam no estudo da cogeração de energia usando este combustível. Estes fatos incentivaram a criação do projeto COGENCASA que consiste no estudo de uma planta de microcogeração para uso residencial instalada na UFPE. Os componentes da planta são uma microturbina, um grupogerador, um chiller de compressão, um chiller de absorção, um termoacumulador de água quente, um termoacumulador de água fria e uma câmara climatizada. Este projeto tem a intenção de realizar estudos comparativos das performances dos equipamentos e de realizar a otimização financeira da planta através de um modelo criado em Matlab e Simulink. O projeto COGENCASA é apenas descrito neste trabalho por ter motivado a criação do modelo para a realização da otimização financeira da planta. A modelagem dos equipamentos e os principais componentes do modelo são explanados neste trabalho. A otimização é realizada sobre a forma de operação dos equipamentos de acordo com um módulo de configuração de tarefas que possibilita uma estratégia de utilização dos equipamentos para atender demandas térmicas e elétricas variáveis, ou seja, o modelo realiza simulações dinâmicas. Este módulo é um dispositivo que recebe as demandas e as características dos equipamentos e, através de chaves, determinam a forma de funcionamento dos equipamentos. Neste trabalho são realizados estudos de casos de simulação e de otimização. Ocorre a simulação com a variação das chaves e também de condições alheias à de projeto. É realizada a otimização de um grupo de chaves a fim de obter a melhor máquina térmica para a planta e é realizada a otimização sobre a máquina térmica ótima obtida com condições alheias à de projeto. Diversas análises são realizadas através das performances dos equipamentos e dos valores presentes líquidos. Cenários são criados de acordo com as condições financeiras de aquisição de alguns equipamentos que podem ser modificadas no futuro próximo. Também são estudadas situações para decisão de investimento entre o sistema de cogeração e o sistema convencional. O módulo de configuração de tarefas usa 27 chaves (26 binárias e 1 com 5 posições) para determinar o comportamento do sistema. Desta forma é possível gerar $335544320 (2^{26}) \cdot 5$ modos de operação. Com o método de otimização usado, busca exaustiva, o ponto ótimo seria encontrado após muitos anos de simulação (caso cada simulação durasse 10 segundos). Uma das intenções dos estudos de casos é avaliar se existem chaves que tenham predominância sobre as outras na obtenção do Valor Presente Líquido ótimo. A ocorrência deste fato possibilita a criação de um mapa com as chaves mais relevantes e a sua implementação no modelo poderá reduzir drasticamente o tempo de execução.

ABSTRACT

The restructuring of Brazil's power sector has stimulated new studies about distributed power generation. As the governmental strategy proposes a larger share for natural gas in the energetic matrix, many research groups has been concentrating their studies in cogeneration, specially using natural gas. For example, the COGENCASA project studies a residential microcogeneration system installed on UFPE. The microcogeneration system components of the COGENCASA project are a microturbine, an Otto engine, a compression chiller, an absorption chiller, a hot water storage tank, a cold water storage tank and a climatized room. The main aims in the COGENCASA project are to perform comparative studies of equipments performance and to develop a financial optimization method of the plant through a model created in Matlab and Simulink. The optimization is performed over the mode of operation of each one of the equipments, in agreement with a task configuration system. This task configuration system is the responsible to turn on and off each equipament and to choose the level of the generated power. The task configuration system uses 27 keys (26 binary and 1 with 5 position) to determine the system behavior. Is possible to generate 335,544,320 ($2^{26} * 5$) operation mode. The net present value of each one of these modes is calculated. The thermal and electric demands are variable along the day, as the tariffs. The case study is focused on the optimization of the equipment selection and the mode of operation. After the design optimization, the behavior of the system is studied against different demands.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	iii
AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Revisão da literatura	3
1.2 Projeto COGENCASA	6
1.3 Estrutura do modelo	6
1.4 Estudo de casos	13
1.5 Estrutura do trabalho	14
2. PROJETO COGENCASA	15
2.1 Descrição do sistema	15
2.2 Ensaio do sistema	17
2.2.1 Ensaio 1: Sistema operando apenas com a microturbina.	17
2.2.2 Ensaio 2: Sistema operando apenas com o grupo gerador.	17
2.2.3 Ensaio 3: Estudo no sistema de refrigeração	17
2.2.4 Ensaio 4: Estudo na câmara climatizada	18
2.2.5 Ensaio 5: Estudos com o sistema de Termoacumulação	18
2.2.6 Resumo de medições para realização dos ensaios	18
3. MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS	21
3.1 Máquinas térmicas	24
3.2 Caldeiras de recuperação	26
3.3 Chiller de absorção e compressão	27
3.4 Termoacumulador de água quente	29
3.5 Termoacumulador de água fria	33
4. MÓDULO DE CONFIGURAÇÃO DE TAREFAS	37
4.1 Estrutura do módulo de configuração de tarefas	38
4.2 Exemplo da utilização do módulo de configuração de tarefas	45
5. MÓDULO FINANCEIRO	50
5.1 Tarifas	50
5.2 Método de decisão econômica	53
5.3 Procedimento de cálculo no módulo financeiro	57
6. CASO BASE	63
6.1 Dados de entrada do módulo do sistema	63
6.2 Dados de entrada do módulo de demandas	64
6.3 Dados de entrada do módulo de configuração de tarefas	67
6.4 Dados de entrada do módulo financeiro	69
7. ESTUDO DE CASOS – SIMULAÇÃO	73
7.1 Estudo com variação das chaves	73
7.2 Estudo com variação das chaves e da demanda térmica	76
7.3 Estudo com variação das chaves e da demanda elétrica	80
7.4 Estudo com variação das chaves e da tarifa elétrica	84
7.5 Conclusão	87
8. ESTUDO DE CASOS – OTIMIZAÇÃO	89
8.1 Estudo com variação das potências das máquinas térmicas.	90
8.1.1 Primeira variação das potências	90
8.1.2 Segunda variação das potências	93
8.1.3 Terceira variação das potências	97
8.1.4 Quarta variação das potências	99
8.1.5 Quinta variação das potências	103

8.1.6 Discussões finais	106
8.2 Estudo da máquina térmica ótima	108
8.2.1 Estudo com a variação da demanda elétrica	109
8.2.2 Estudo com a variação da demanda térmica	112
8.2.3 Estudo com a variação da tarifa da energia elétrica	114
8.2.4 Estudo com a variação da tarifa do combustível	116
8.2.5 Conclusão	117
9. CONCLUSÕES	120
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	123
ANEXOS	126

1. INTRODUÇÃO

Crises como a do petróleo, ocorrida na década de 70, tornaram os governos e as grandes empresas do mundo inteiro mais atenciosos com assuntos relacionados ao crescimento sustentável de cada país. A energia elétrica é um dos fatores predominantes no crescimento sustentável de uma nação. Com instituições, como bancos e hospitais, por exemplo, cada vez mais automatizadas, a falta de energia, mesmo que por um espaço de tempo muito pequeno, pode provocar grandes perdas econômicas, o que faz com que o conceito de energia centralizada seja repensado, principalmente após problemas de racionamento e black-out ocorridos no Brasil e em outras partes do mundo. A energia gerada localmente praticamente dispensa os sistemas elétricos de transmissão que proporcionam uma má qualidade da energia e riscos de queda de energia por acidentes aleatórios ou devido a condições climáticas. A energia gerada localmente também favorece a competitividade e possibilita que problemas de suprimentos de energia sejam rapidamente solucionados através da iniciativa privada.

Essa geração de energia elétrica produzida no próprio local de consumo e/ou próxima a um centro de carga é chamada de geração distribuída e contrasta totalmente com a geração centralizada (figura 1.1), formada de centrais de grande porte interligadas aos consumidores através de longas linhas de transmissão.

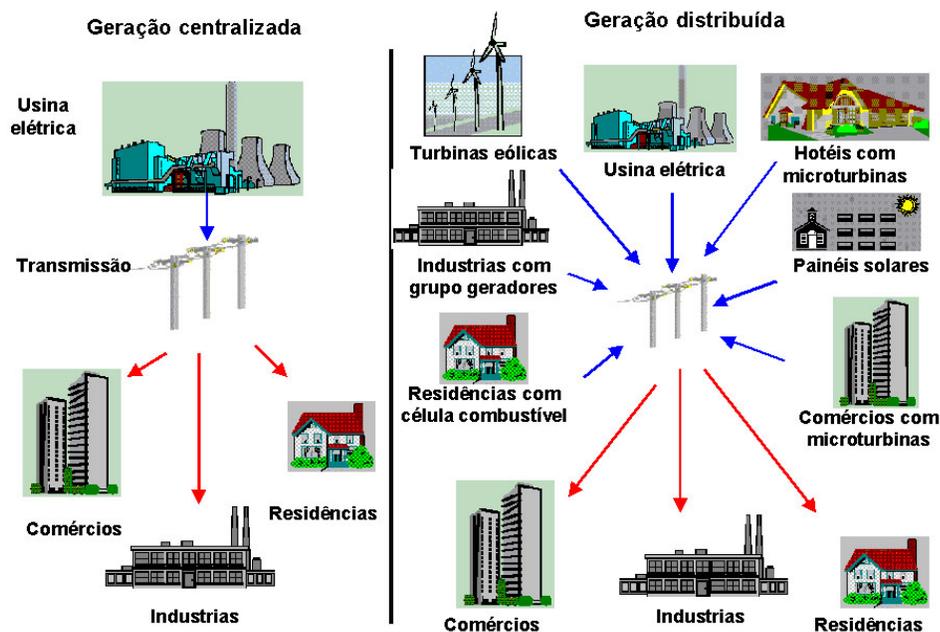


Figura 1.1: geração distribuída versus geração centralizada

No caso específico do Brasil, a maior fonte de energia elétrica é a hídrica, porém, após passar um longo período onde a demanda de energia elétrica cresceu mais que os investimentos em geração de energia associados a um grande período de estiagem, houve uma grave crise no setor elétrico brasileiro. Isto despertou no governo a intenção de apoiar o uso da iniciativa privada para proporcionar uma rápida solução para a crise do setor, bem como transformar o setor elétrico de um sistema monopolístico para um sistema baseado na competitividade. Com isto a geração distribuída foi fortemente favorecida, e em especial a cogeração de energia devido a uma expansão na oferta de gás natural e ao uso mais racional da energia.

A Cogeração pode ser definida como a geração simultânea de energia térmica e mecânica, a partir de uma mesma fonte primária de energia. A energia mecânica pode ser utilizada na forma de trabalho (p. ex. acionamento de moendas, numa usina de açúcar e álcool) ou transformada em energia elétrica através de gerador de eletricidade; a energia

térmica é utilizada como fonte de calor para um processo (numa indústria, hospital, shopping center, etc.). A cogeração de energia elétrica contribui com a racionalidade energética, uma vez que possibilita um melhor aproveitamento dos combustíveis, apresentando menor consumo total, quando comparada à geração individual de calor e energia elétrica. A cogeração pode ser realizada de diversas formas como:

- Cogeração com utilização de turbinas a vapor: composto basicamente de caldeira de vapor superaquecido para a produção de vapor, turbina a vapor e alternador para a produção de energia elétrica ou força motriz, caldeira de recuperação para aproveitamento do vapor após utilização na turbina para utilização em processo. Este tipo de cogeração é basicamente utilizado na indústria.

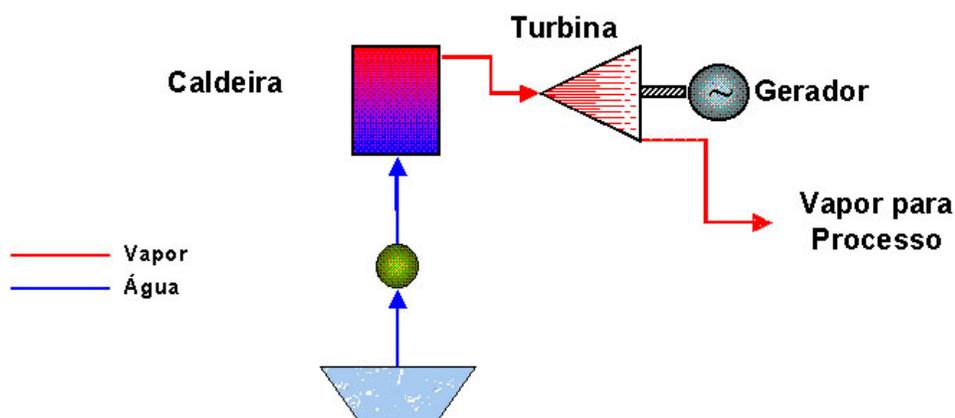


Figura 1.2: Exemplo de cogeração com uso de turbina a vapor

- Cogeração com utilização de turbinas a gás: Composto basicamente de turbina a gás (com compressor, câmara de combustão e turbina movida com expansão após a combustão que pode estar ligada a alternadores, bombas, moendas e sopradores) e caldeira de recuperação que aproveita a energia contida nos gases de exaustão na utilização em processos como de secagem, geração de vapor para uso industrial e aquecimento de fluido térmico. Este tipo de cogeração é utilizado na indústria, hospitais, hotéis e unidades comerciais.

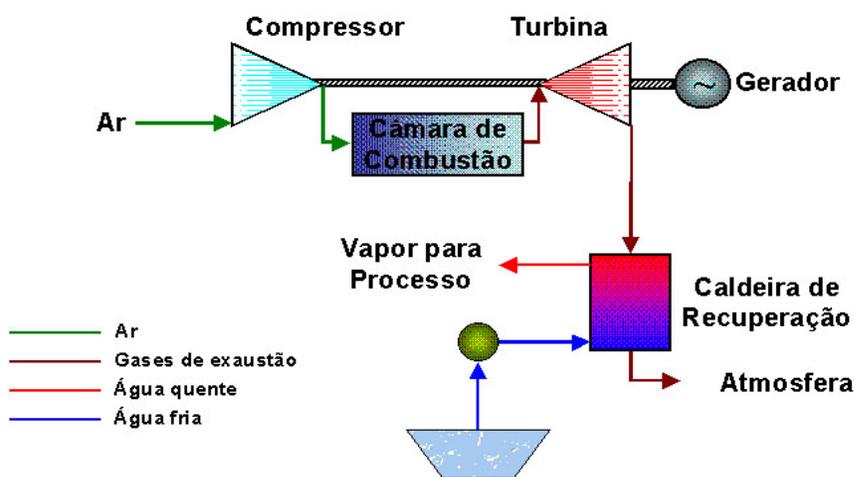


Figura 1.3: Exemplo de cogeração com uso de turbina a gás

- Cogeração com motores alternativos de combustão interna: Composto basicamente por motor de combustão interna acoplado a um alternador para a geração de energia

elétrica e caldeira de recuperação para aproveitamento de energia desperdiçada do combustível que pode utilizar o calor residual contido nos sistemas de escape, lubrificação e refrigeração para o aquecimento de água ou até mesmo gerar pequenas quantidades de vapor a baixa pressão e temperatura. Este tipo de cogeração é utilizado na indústria, hospitais, hotéis e unidades comerciais.

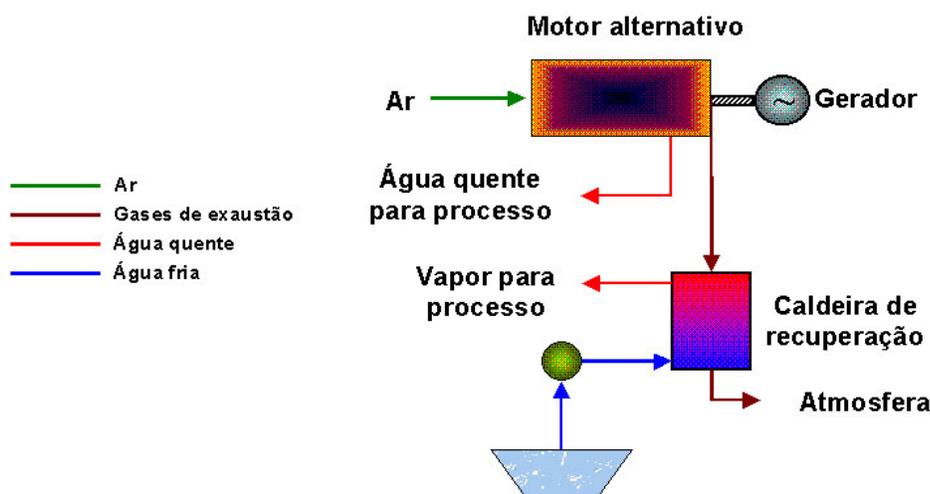


Figura 1.4: Exemplo de cogeração com uso de motor alternativo

- Cogeração com ciclo de absorção: Neste tipo de cogeração pode ocorrer a utilização dos equipamentos dos tipos de cogeração já citados, porém a utilização de energia térmica reaproveitada da energia do combustível que seria desperdiçada se dá na geração de frio através de chillers de absorção. Os maiores usuários deste tipo de cogeração são hotéis, hospitais, indústrias com processos frigoríficos e unidades comerciais.

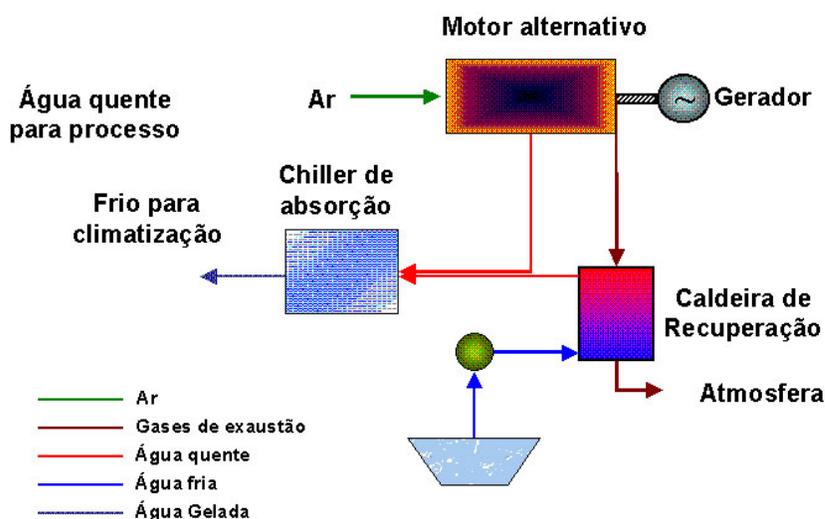


Figura 1.5: Exemplo de cogeração com uso de do ciclo de absorção.

1.1 Revisão da literatura

Na atualidade existem diversos trabalhos relativos ao uso do gás natural, à geração distribuída, à cogeração e à simulação e otimização de sistemas térmicos. Alguns exemplos são mencionados nesta seção.

Dunn & Flavin (2000) apresentaram as inovações tecnológicas que estão ocorrendo mundialmente, diante da conjuntura do setor energético de cada país, em relação a equipamentos capazes de gerar energia em pequena escala (Microenergia). São apontadas quais as vantagens, as desvantagens e qual o cenário mundial de utilização destes equipamentos. Alguns dos exemplos dados pelos autores destes equipamentos que proporcionam a geração distribuída são: microturbina, célula combustível, painel solar, turbina eólica e motor alternativo.

Szklo et al (2000) apresentaram os incentivos que estão ocorrendo para o uso do gás natural na cogeração no Brasil e realizaram uma análise econômica a partir de um modelo, desenvolvido para este fim, em dois estudos de casos, um no setor comercial e outro numa planta química. Possuindo dados técnicos de equipamentos existentes no mercado e recebendo dados como as demandas térmica e elétrica eram realizadas variações tarifárias para a realização de análises econômicas, que mostraram as condições para que os investimentos obtivessem uma maior taxa interna de retorno. Contudo os autores concluíram que os investimentos em cogeração só se tornariam atrativos se houvesse incentivos em políticas tarifárias.

Szklo & Tolmasquim (2001) apresentaram ações realizadas pelo governo para proporcionar o incentivo ao uso do gás natural em sistemas de cogeração para a ampliação da geração distribuída no Brasil. No trabalho são apresentados o que foi acertado, o que ficou incompleto e as mediações equivocadas que o governo brasileiro tinha tomado. Para investimentos em sistemas de cogeração, é enfatizada a necessidade da realização de análises do potencial térmico, do potencial técnico, do potencial econômico e do potencial de mercado exemplificando com o que tem ocorrido no mundo e ilustrando a necessidade de se atentar a estratégia no uso de sistemas de cogeração.

Szklo & Tolmasquim (2002) realizaram uma análise do impacto das mudanças no contexto regulatório da cogeração no Brasil, fazendo um estudo comparativo com a experiência do que ocorreu no contexto internacional. Foram apresentados os objetivos predominantes da política de incentivo da cogeração no Brasil e o seu contexto institucional verificando o comércio do excesso de energia, a transmissão, a distribuição, demandas suplementares e a qualificação dos investimentos em cogeração.

Szklo et al (2003) propõem uma estimativa do uso de sistemas de cogeração baseado em uma classificação dos hospitais brasileiros através indicadores de consumo de energia específico levando em consideração máquinas térmicas a gás natural associadas com sistemas de refrigeração por absorção. O potencial técnico estimado gira em torno de 500 MWe em meio a uma lista de obstáculos que o setor hospitalar tem enfrentado, sendo algumas ações foram propostas para a superação destes.

Szklo et al (2004) realizaram um estudo para estimar o potencial técnico e econômico do uso da cogeração a gás natural em indústrias químicas brasileiras. Baseados na ideia de grupos ou ramificações, foi estruturado uma grande quantidade de cenários futuros influenciados por alterações nos potenciais técnico/econômico e econômico/político (políticas de incentivo). Os autores concluíram que a cogeração em indústrias químicas brasileiras possui um maior favorecimento à viabilidade quando analisada não somente em termos técnicos e econômicos, mas também estratégicos.

Khan & Rasul (2004) realizaram um estudo técnico/financeiro comparativo entre o uso da cogeração propriamente dito e o uso da cogeração acompanhado de um sistema de

termoacumulação de água fria. Foi utilizada uma máquina térmica a diesel, um sistema de refrigeração por compressão e um chiller de absorção. Alguns cenários foram criados relacionando a potência a ser gerada com a demanda a ser suprida existindo possibilidade da compra de energia elétrica da rede de distribuição. As demandas térmicas de refrigeração apresentavam variações diárias. Para os casos estudados pelos autores o sistema utilizando termoacumulação apresentou maiores vantagens na redução do consumo de energia havendo também economia em termos financeiros.

Cardona & Piacentino (2003) demonstraram uma metodologia na realização de medições em duas plantas de trigerção (geração de energia elétrica, energia térmica de refrigeração e energia térmica de aquecimento) para uso em escritórios. Diferentes parâmetros dinâmicos de fluidos foram monitorados para construir uma curva acumulativa da potência térmica gerada. Segundo os autores, os dados obtidos ajudarão não apenas na escolha do critério de administração da planta, mas evidenciarão relações existentes entre os formatos das curvas de consumo e a escolha das variáveis mais apropriadas no projeto.

Míguez et al (2004) apresentaram um novo mini-sistema de trigerção concebido para uso doméstico que consiste em um motor alternativo movendo um gerador de energia elétrica e provendo energia térmica através dos gases de exaustão e um trocador de calor. O motor também movimenta um compressor que é utilizado num sistema de refrigeração por compressão. O sistema possui ainda um termoacumulador de água quente que acumula a água proveniente do trocador de calor. Os autores fazem uma análise da performance deste sistema, comparando diferentes formas de operação, chegando à conclusão que o uso do sistema de compressão é crucial para proporcionar um aumento da eficiência de todo o sistema. Os autores também realizaram estudos que testaram este sistema com várias formas de operação, analisando sua performance anual e mostrando sua aplicabilidade no uso doméstico.

Ho et al (2004) realizaram estudos sobre um sistema de cogeração com uma turbina e um chiller de absorção realizando variações do período de operação da microturbina, da carga térmica e da potência gerada pela microturbina. Foram observadas a performance do sistema, a temperatura dos gases de exaustão e a temperatura de entrada no chiller de absorção. Para a utilização do chiller, os autores também realizaram o dimensionamento de dois trocadores de calor. Foi observado que o sistema atinge maior eficiência quando os equipamentos tendem a utilização com capacidade máxima.

Agnew et al Anderson (2004) desenvolveram um estudo de simulação de um sistema de cogeração com ciclo rankine utilizando uma turbina a vapor e um chiller de absorção utilizado para esfriar o condensador do ciclo rankine para compensar a diminuição da performance do ciclo quando está operando em condição de temperatura ambiente muito elevada. Os autores concluíram que a energia fornecida ao chiller, quando de simples efeito, é insuficiente. Contudo nos estudos de casos realizados com um chiller de absorção de duplo efeito, foi possível verificar um COP para atingir os objetivos desejados.

Vieira et al (2004) demonstraram o desenvolvimento e a implementação automatizada de uma metodologia interativa para realizar melhorias exegéticas e econômicas de sistemas térmicos integrados com um processo de simulação. A metodologia identifica as variáveis mais importantes que afetam o custo total do sistema e a eficiência exegética, classifica hierarquicamente os componentes, identifica os termos predominantes na composição do custo total e escolhe as principais variáveis de decisão no processo interativo. O processo de simulação ocorre com a utilização do Visual Basic, Microsoft Exel e IPSE em conjunto.

Carraretto & Lazzaretto (2004) apresentam um modelo que usa de aproximações dinâmicas na otimização do horário de produção de plantas termoelétricas limitando a produção total de energia de acordo com as condições de mercado. Estudos de casos são realizados com variações no preço do combustível e na tarifa de energia elétrica.

Wisshusen & Schmitz (2004) apresentaram as vantagens no uso de simulações dinâmicas de sistemas de energia em análises transientes, realizando comparações entre simulações dinâmicas e estáticas. Também foi demonstrado a modelagem orientada ao objeto de um trocador de calor usando a linguagem do software Modelica.

Knight et al (2004) descreveram uma análise sobre uma planta de cogeração usando uma turbina a gás baseada na performance econômica, através de uma ferramenta de otimização (PSEconomy) comumente utilizada em estágios preliminares de projeto. No trabalho, um estudo de caso é descrito mostrando as áreas de aplicação, a utilidade e a estrutura deste software.

Alguns outros trabalhos mostram que a modelagem de plantas térmicas de cogeração tem sofrido grandes avanços na última década. Por exemplo, Manolas et al (1996) apresentou o uso de algoritmos genéticos na fase de otimização. Accadia (2001) apresentou a comparação entre vários modos de operação em plantas com demanda estática. Gamou et al (2002) otimizaram uma planta de cogeração com variações diárias e com incertezas na demanda elétrica.

1.2 Projeto COGENCASA

Diante do cenário do setor elétrico brasileiro, das novas reflexões do uso da geração distribuída, em especial com uso da cogeração, e da expansão da utilização do gás natural que está ocorrendo no Brasil, surgiram muitos grupos de pesquisas nesta área. O grupo de engenharia térmica da Universidade Federal de Pernambuco é um destes grupos, que se focaliza, no presente momento, em estudos sobre uma planta de microcogeração que está sendo instalada na universidade (projeto COGENCASA). Um sistema de microcogeração trabalha com baixa geração de energia elétrica (com máximo próximo a 150 kW) e é utilizado em unidades comerciais e até residenciais. O sistema de microcogeração do projeto COGENCASA é constituído de uma microturbina, um grupo gerador, dois trocadores de calor, um chiller de absorção, um split, um termoacumulador de água quente e um de água fria. Serão realizados estudos sobre as máquinas térmicas (grupo gerador X microturbina), sobre o sistema de refrigeração (split X chiller de absorção), estudos de viabilidade técnica e econômica e otimização financeira. Variações de demandas térmicas serão realizadas através de um banco de resistência e de uma câmara climatizada. Demandas elétricas e de água quente correspondentes a uma casa também serão simuladas. A ligação entre o projeto COGENCASA e o modelo apresentado neste trabalho é a utilização deste para realizar a otimização financeira do projeto. Contudo, antes da realização da otimização do sistema de microcogeração será necessária a finalização da instalação da planta para que todos os dados dos equipamentos possam ser, de uma maneira mais precisa, inseridos no modelo.

1.3 Estrutura do Modelo

A implementação do modelo que será apresentado neste trabalho pode ser realizada por diversos caminhos. Existe atualmente uma grande quantidade de softwares que podem ser utilizados na implementação de modelos para a realização da otimização de sistemas térmicos. Alguns foram preparados exclusivamente para este fim, possuindo grande quantidade de detalhes para a realização de projetos de sistemas térmicos desde a fase mais

inicial do investimento até a contabilização completa de todos os custos operacionais. Alguns exemplos de softwares capazes de implementar modelos para a otimização de sistemas térmicos são apresentados na tabela 1.1 com suas vantagens e desvantagens.

Tabela 1.1: Exemplo de softwares utilizados atualmente.

Softwares	Vantagens	Desvantagens
Simulink	- Modular - Usado com grande focalização na criação de sistemas de controle	- Solver não é robusto para sistemas térmicos não lineares - Não possui propriedades termodinâmicas
Power flow	- Capaz de realizar a simulação com detalhamento completo no sistema térmico. - Dados comerciais	- Demandas fixas - É apenas utilizável para termoelétricas de grande porte - Simulações estáticas - Otimização muito rudimentar - Não simula refrigeração
EES	- Fácil utilização - Preparado com propriedades termodinâmicas - Versátil	- Não modular - Solver limitado
Linguagem C++	- Versátil	- Não possui interface gráfica - Não possui propriedades termodinâmicas
IPSE	- Modular - Preparado com propriedades termodinâmicas - Dados comerciais	- Simulações estáticas - Não otimiza

O modelo utilizado neste trabalho foi concebido através dos softwares Matlab e Simulink, que possuem grande focalização na criação de sistemas de controle. A utilização destes softwares proporciona também uma fácil implementação, pois o Simulink possui interface gráfica onde a criação do programa ocorre com a utilização de diagramas de blocos, criando assim uma estrutura modular. Desta forma qualquer alteração ou detecção de erros torna-se mais fácil de ser realizada e a visualização de todo o modelo é bem mais simples.

Como a otimização é realizada com demandas variáveis (simulações dinâmicas) e sobre variáveis booleanas (controle de variáveis binárias) o simulink torna-se bastante apropriado, apesar de não trabalhar com propriedades termodinâmicas e não possui um solver robusto. Para estas duas últimas características o IPSE é mais apropriado, porém este software está impossibilitado de realizar as simulações dinâmicas com as variáveis booleanas.

O modelo foi concebido para ser utilizado como ferramenta no projeto COGENCASA, na otimização financeira da planta de microcogeração. Todavia ele também pode ser utilizado de maneira geral para a realização da otimização de sistemas de cogeração com qualquer faixa de potência, utilizando máquinas térmicas com queima direta de qualquer combustível, com equipamentos de recuperação de calor dos gases de exaustão das máquinas térmicas, com sistema de refrigeração usando energia elétrica e/ou de absorção e usando ou não termoacumulação de água fria.

A construção do modelo foi realizada em parte no software Matlab e em parte no Simulink. No Matlab são inseridos os dados de entrada, são realizadas algumas operações de cálculo dos custos e do VPL, são gerados arquivos com as variações das potências dos equipamentos e de temperatura do termoacumulador no decorrer do tempo, entre outras operações simples. No caso do Simulink, nele é realizada toda a modelagem dos equipamentos, está montado o sistema de controle dos equipamentos e o sistema que possibilita a geração de demandas variáveis e todo o processamento de dados do sistema de cogeração para a obtenção das potências desenvolvidas pelos equipamentos gerando os dados

para a realização do cálculo do custo de consumo do sistema de cogeração e do sistema convencional de energia elétrica.

A figura 1.6 apresenta a tela principal do modelo realizada no Simulink. Sua construção em diagramas de blocos (modular) possibilita fácil visualização e alteração. Os dois blocos verdes à direita estão recebendo as potências desenvolvidas pelos equipamentos no decorrer do tempo e calculando os custos com consumo. No maior bloco, situado à esquerda, são obtidas todas as potências desenvolvidas pelos equipamentos no decorrer do tempo.

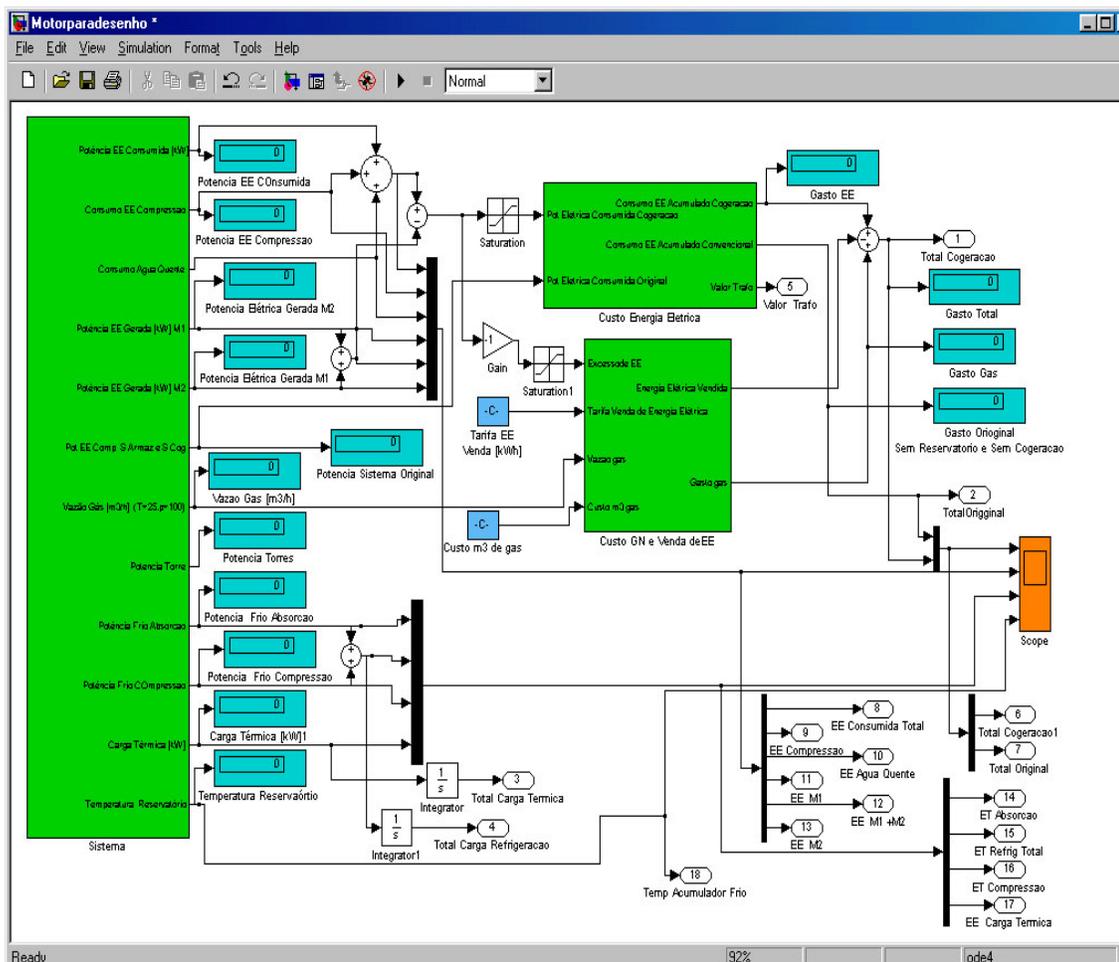


Figura 1.6: Tela principal do modelo realizada no Simulink.

Entrando no bloco sistema (bloco à esquerda na figura 1.6) pode ser visualizada outra estrutura modular (figura 1.7) que possui um bloco responsável pelo controle de todos os equipamentos (bloco superior à esquerda), um bloco responsável pelo sistema de cogeração calculando todas as potências consumidas pelos equipamentos, vazão de combustível que alimenta as máquinas térmicas, temperaturas dos termoacumuladores e etc (bloco superior à direita), um bloco responsável pela geração das demandas térmicas e elétricas variáveis (bloco inferior à esquerda) e um bloco responsável pelo sistema convencional, calculando o consumo de energia elétrica (bloco inferior à direita).

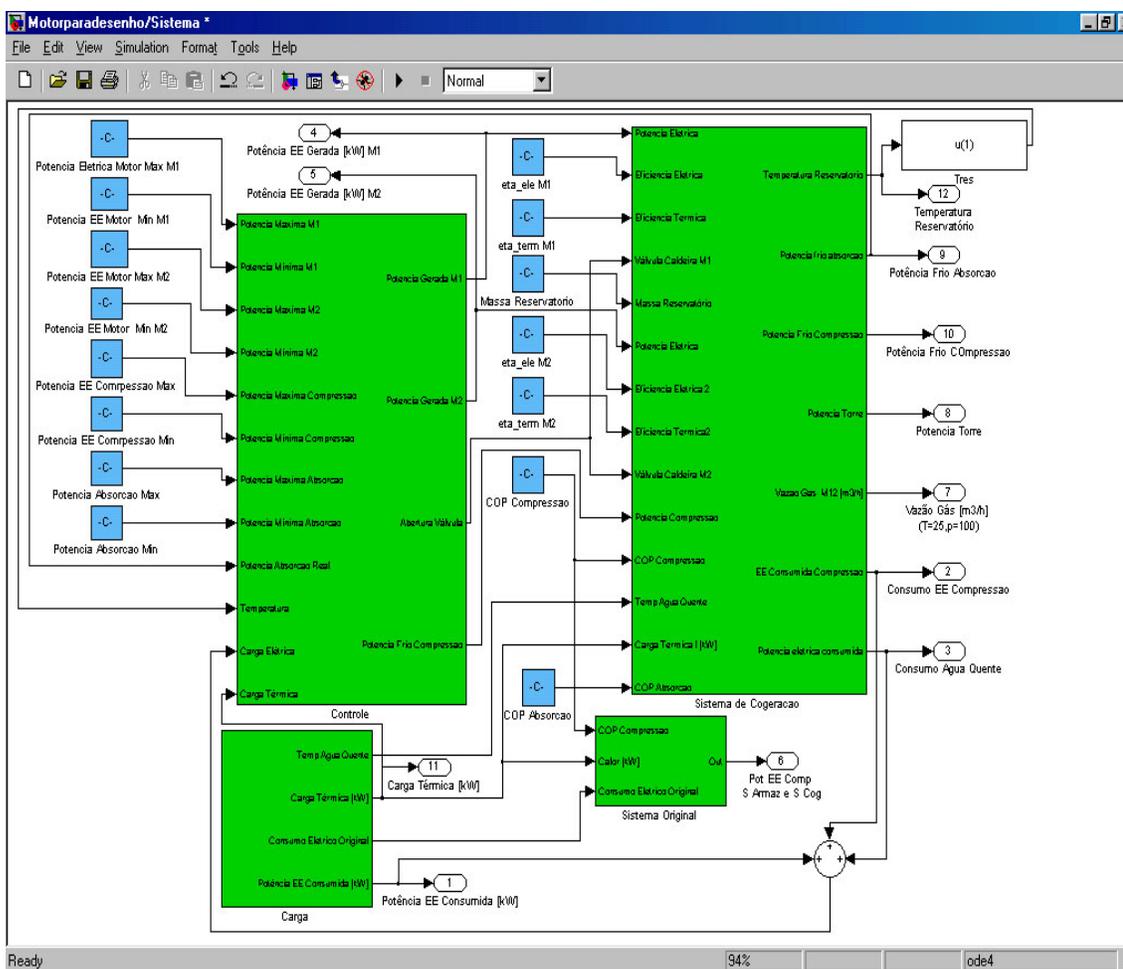


Figura 1.7: Estrutura modular interna ao bloco sistema da tela principal.

A figura 1.8 apresenta o interior do bloco sistema de cogeração (bloco visualizado na parte superior à direita da figura 1.7 – estrutura modular interna ao bloco sistema da tela principal). Nesta figura visualiza-se todos os equipamentos que podem ser utilizados no sistema de cogeração do modelo, ou seja, duas máquinas térmicas para a geração de energia elétrica com queima de combustível como fonte primária de energia (dois blocos à esquerda), duas caldeiras de recuperação para reaproveitamento dos gases de exaustão provenientes das duas máquinas térmicas na produção de água quente ou vapor (dois blocos vizinhos à direita das duas máquinas térmicas), um termoacumulador de água quente que utiliza os gases de exaustão após passarem pelas duas caldeiras de recuperação para atender demanda de água quente em uso residencial (chuveiro, piscina e etc), comercial (piscinas e chuveiros de hotéis, processos de lavagem de roupas e etc) e em processos industriais em geral (bloco vizinho à direita das caldeiras de recuperação), um chiller de absorção (utiliza a água quente proveniente das caldeiras de recuperação como fonte primária de energia) e um de compressão (utiliza energia elétrica como fonte primária de energia) para suprir a demanda do sistema de refrigeração seja no uso de climatização de ambientes tanto para o uso residencial ou comercial ou seja na utilização de armazenamento frigorífico ou qualquer outra forma de demanda térmica de frio (bloco na extremidade direita inferior) e, por fim, um termoacumulador de água fria que acumula água fria nos períodos em que os chillers de compressão e de absorção trabalham com potência superior à demanda térmica de refrigeração, para ser utilizadas nos momentos em que ocorrem valores mais altos desta demanda (bloco na extremidade direita superior).

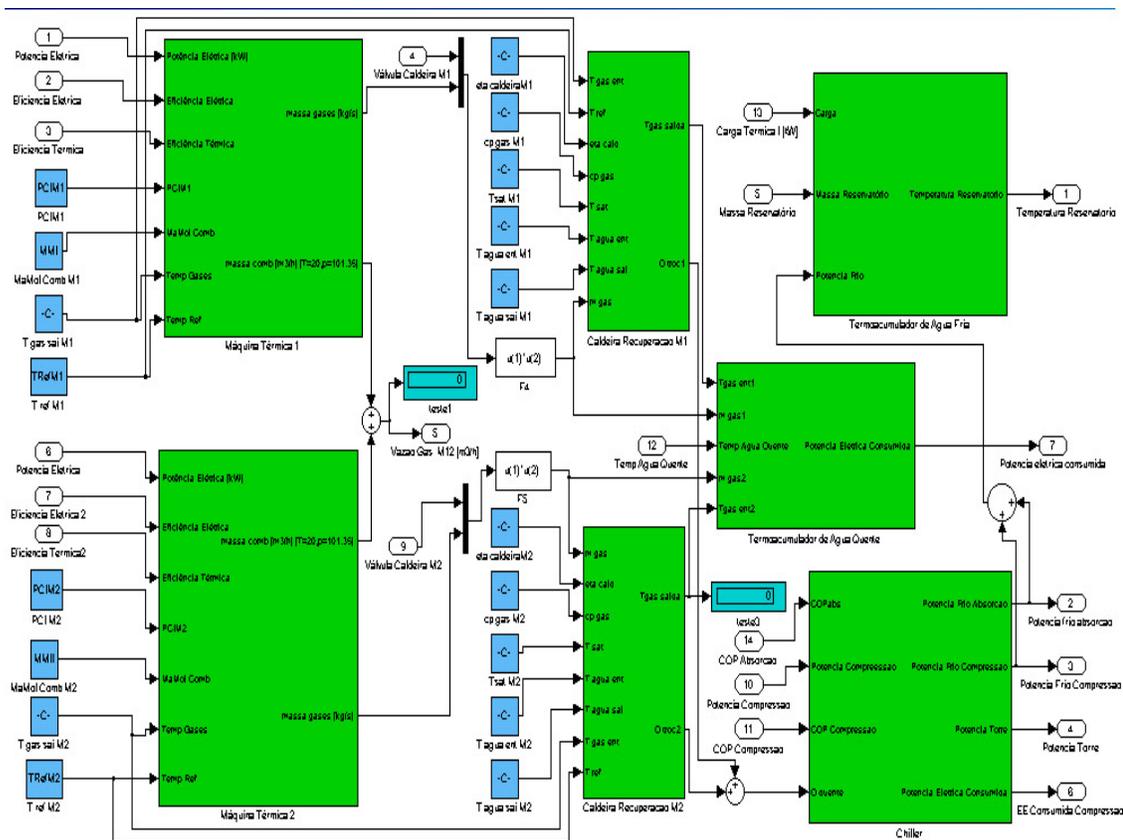


Figura 1.8: Interior do bloco sistema de cogeração.

A figura 1.9 apresenta o interior do bloco sistema de controle (bloco visualizado na parte superior à esquerda da figura 1.7 – estrutura modular interna ao bloco sistema da tela principal). Nesta figura visualiza-se os dispositivos que proporcionam o controle dos equipamentos e assim de todo o sistema de cogeração, gerando diversas formas de funcionamento deste sistema, alcançando resultados financeiros também distintos.

Para que se entenda melhor qual a função deste dispositivo de controle dos equipamentos e a sua relação com o módulo de demandas, pode-se imaginar uma situação cotidiana. Numa casa comum é gerada uma demanda variável ao longo de um dia. No início da manhã alguns eletrodomésticos são ligados para fazer o café da manhã e o chuveiro elétrico também é utilizado por um espaço curto de tempo. Neste caso uma pequena demanda elétrica e de água quente está sendo requisitada, e o sistema de cogeração tem que responder de alguma forma a estas necessidades. Com uma demanda elétrica não muito alta o sistema de controle deve decidir qual máquina térmica deve ser ligada e com que potência. Uma vez que a máquina térmica está ligada, o chiller pode ser ligado ou não para acumular energia térmica de refrigeração. No decorrer do resto do dia a demanda elétrica pode ser baixíssima e o sistema de controle pode estar determinado para não deixar que nenhum equipamento do sistema de cogeração funcione, passando a energia a ser comprada diretamente da rede de distribuição. Contudo, chegando o final de expediente, no qual a energia elétrica é mais cara, as pessoas geralmente chegam em casa e ligam, ao mesmo tempo, todo o tipo de equipamento como som, televisão, ventilador, ar-condicionado, cafeteira, liquidificador e etc. A demanda elétrica chega a seu ápice quando vários chuveiros elétricos são ligados de uma vez. Nesta situação as máquinas térmicas podem ser comandadas pelo sistema de controle a ligar com toda sua capacidade, gerando também água quente pra ser usada no lugar do chuveiro elétrico, e o chiller de absorção também pode funcionar, já acumulando energia térmica de refrigeração para a climatização dos quartos antes do repouso.

O funcionamento do sistema de controle pode ocorrer em casos bem complexos que proporcionariam uma compreensão mais difícil, como na atuação em plantas industriais, por exemplo. Porém a visualização deste sistema no bloco sistema de controle, visualizado na figura 1.9, não é muito complicada. Os dois blocos verdes à esquerda controlam as duas máquinas térmicas e os dois blocos verdes à direita controlam os dois chillers (na parte superior o de absorção e na parte inferior o de compressão). Os dois blocos brancos determinam qual equipamento deve ser tomado como principal. Um para o atendimento da demanda elétrica (age nas duas máquinas térmicas) e outro para o atendimento da demanda térmica de refrigeração (age no chiller de compressão e no de absorção). O equipamento escolhido como principal percebe toda a demanda e o que não é principal percebe a demanda total menos a potência já gerada pelo equipamento principal.

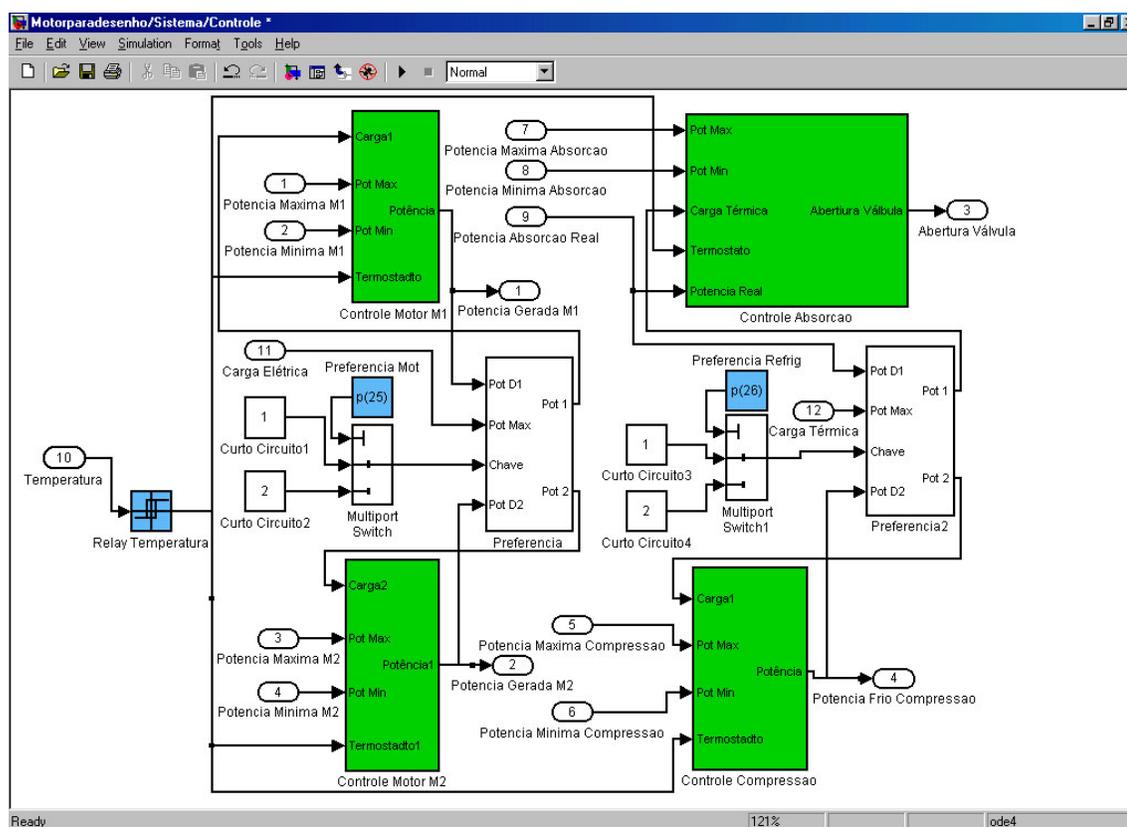


Figura 1.9: Interior do bloco sistema de controle.

O módulo de configuração de tarefas proporciona o controle dos equipamentos, como apresentado no exemplo da casa, e representa o ponto central da otimização realizada no modelo. Cada um dos blocos apresentados na figura 1.9 possui sinais de entrada que, de acordo com posições de chaves internas existentes nos blocos, comandará o ligamento, o desligamento e a forma do equipamento funcionar. É então proporcionada uma otimização na forma de funcionamento do sistema de cogeração a partir destes dispositivos de configuração de tarefas, uma vez que o modelo possui um total de 27 chaves (26 binárias e 1 de 5 posições). A otimização é realizada com a variação de cada uma das chaves gerando formas diferentes de funcionamento de cada equipamento, assim gerando um resultado financeiro do empreendimento diferente para cada forma de operação. Realizando a otimização de todas as chaves, pode ser gerado um total de 335.544.320 ($2^{26} * 5$) combinações determinando as formas dos equipamentos funcionarem.

Um fator muito importante deste modelo é a sua utilização com demandas variáveis, uma vez que a maioria dos softwares de otimização trabalha com simulações estáticas para

um valor fixo de demanda. Desta forma realizada pelo modelo, é possível se aproximar mais do caso real onde a demanda varia no decorrer do dia, representando o consumo das pessoas comuns nos horários que elas costumam utilizar em maior ou menor proporção a energia elétrica, o sistema de refrigeração e água quente, tanto para residências, quanto para comércios e indústrias. Na figura 1.10 é apresentado um exemplo de demanda elétrica, gerada pelo programa e requisitada ao sistema de cogeração. No eixo horizontal decorre o tempo num período de dois dias (48 horas), no eixo vertical está a potência elétrica demandada.

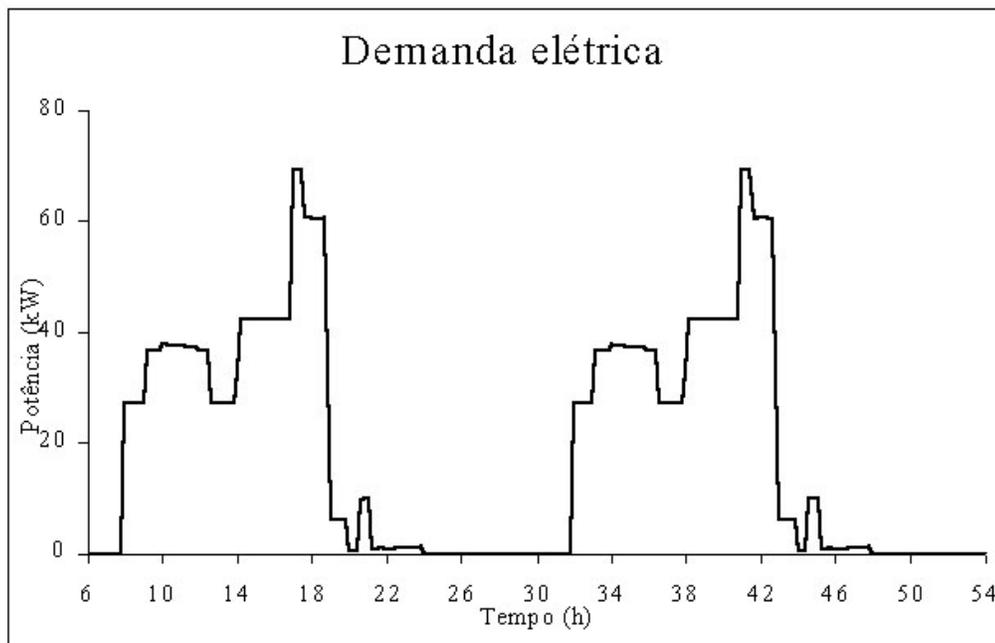


Figura 1.10: Exemplo de demanda elétrica variável.

O modelo realiza a otimização de sistemas de cogeração (com demandas variáveis) sobre o comportamento dos equipamentos, determinado pelo módulo de configuração de tarefas utilizando o método de busca exaustiva. Todo o procedimento pode ser resumido da seguinte forma:

- 1- As curvas de demandas elétricas, cargas térmicas e de água quente são dadas.
- 2- As variações das configurações das potências nominais dos equipamentos (microturbina, Grupo gerador, split de compressão e chiller de absorção) são especificadas.
- 3- As características (eficiências, volumes dos termoacumuladores, etc) de todos os equipamentos são especificadas, assim como os seus custos específicos.
- 4- O estado inicial de cada chave é escolhido.
- 5- As variações das chaves são escolhidas. Como é impossível utilizar todas as combinações em virtude do tempo para executar todas as combinações, somente algumas chaves podem ser escolhidas para variar seus estados durante o processo de otimização.
- 6- Todas as possíveis combinações das configurações das potências nominais e variações das chaves são geradas.
- 7- Para cada uma das combinações, o modelo calcula o VPL (valor presente líquido) do investimento inicial e dos custos com a energia elétrica e o combustível.
- 8- O modelo calcula o VPL do chamado sistema convencional quando não existe nenhuma cogeração e nem termoacumulação.
- 9- O resultado do modelo, para todas as possibilidades, incluindo o sistema convencional, é dado para a configuração do sistema que possui o menor VPL.

1.4 Estudo de casos

A utilização deste modelo possibilita um gigantesco número de análises sobre o comportamento do sistema de cogeração sendo influenciado pelas demandas requisitadas e pelas configurações das chaves do módulo de configuração de tarefas. Para sua utilização tanto no projeto COGENCASA como na otimização financeira de qualquer planta que venha a ser estudada é necessário realizar previamente uma grande quantidade de estudos de casos para que, se possa criar uma sensibilidade na utilização do modelo e na análise de seus resultados e além disso para avaliar o próprio modelo, verificando qual o grau de contribuição em análises de otimização financeiras que ele pode proporcionar, observando também as possibilidades de melhorias.

Para cada combinação de chaves realizada, o modelo, além de retornar com os valores presentes líquidos dos sistemas convencional e de cogeração, também apresenta gráficos com a demanda elétrica e a potência elétrica consumida (chiller de compressão) ou fornecida (máquinas térmicas) de cada equipamento, com a demanda térmica e a potência térmica de refrigeração geradas pelos chillers de absorção e de compressão, e com a evolução da temperatura do termoacumulador de água fria, todos variando com o tempo. Cada detalhe provocado pela forma de operação diferente do equipamento pode ser visualizado nos gráficos que, desta forma, proporcionam uma maneira mais fácil de observar como a mudança na combinação das chaves está influenciando na determinação da opção ótima de operação do sistema de cogeração e na escolha do melhor sistema a ser utilizado (convencional ou cogeração).

Nos estudos de casos realizados neste trabalho, são realizadas as análises sobre gráficos que apresentam a potência gerada por cada equipamento, para cada uma das combinações de configurações de chaves geradas. Estes estudos estão divididos da seguinte forma:

1- Simulação com variações de chaves e situações alheias a de projeto: Nesta primeira parte pretende-se a simulação das 26 chaves binárias variando uma a uma e em seguida executar as mesmas simulações com condições diferentes daquelas de projeto com variação nas demandas de energia elétrica e térmica e nas tarifas de energia elétrica. Será gerado, então, um total de um total de 104 ($4 * 26$) casos, cada um com os gráficos demonstrando as performances dos equipamentos, sendo estes analisados e comparados juntamente com os seus respectivos VPLs.

2- Otimização das chaves com variações de máquinas térmicas: Nesta segunda parte pretende-se realizar a otimização de um grupo de 5 chaves juntamente com a otimização na escolha das máquinas térmicas (5 opções diferentes) a serem usadas no sistema de cogeração. O total de casos nesta parte do estudo é de 160 ($5 * 2^5$) casos, procedendo-se às mesmas análises sobre os gráficos juntamente com os VPLs. A partir da descoberta da melhor máquina térmica alguns cenários podem ser montados para os custos de investimentos futuros que estes equipamentos possam chegar, uma vez que muitos investimentos em tecnologia da microcogeração estão sendo realizados no mundo inteiro, trazendo redução de custos operacionais, redução de custos de fabricação, melhorias de eficiências e etc.

3- Otimização das chaves com situações alheias à de projeto: Nesta terceira parte pretende-se realizar a otimização de outro grupo de 5 chaves, com a opção de máquinas térmicas ótima obtida na primeira otimização, a fim de avaliar o sistema sobre 8 condições alheias à de projeto. O total de casos nesta parte do estudo é de 256 ($8 * 2^5$) casos, procedendo-se as mesmas análises sobre os gráficos juntamente com os VPLs. Também é realizada uma avaliação na escolha entre a utilização do sistema convencional ou o de cogeração. Uma vez que um dos dois sistemas já esteja sendo usado pelo investidor, mas com a pior das duas opções, é analisado o que implicaria uma mudança de sistema assumindo um prejuízo com a troca.

1.5 Estrutura do trabalho

O trabalho é dividido em apresentação do projeto COGENCASA, descrição do modelo e estudo de casos. O capítulo 2 consiste na apresentação do projeto COGENCASA, quais os seus objetivos e como estes serão atingidos. O capítulo 3 apresenta a modelagem dos equipamentos existentes no modelo. O capítulo 4 explica o módulo de configuração de tarefas e o capítulo 5 apresenta o módulo financeiro. O capítulo 6 apresenta o caso base de onde partiram as configurações originais das chaves juntamente com todos os dados de entrada utilizados para a realização de todos os estudos. No capítulo 7 e 8, onde ocorrem todas as análises realizadas sobre o modelo, estão os estudos de casos de simulação e de otimização, respectivamente.

2. PROJETO COGENCASA

O projeto COGENCASA consiste numa planta de cogeração que está sendo instalada na UFPE, com fundos da própria UFPE, FINEP, Petrobrás e Copergás. Um galpão (figura 2.1) foi construído para abrigar o sistema onde serão realizados todos os ensaios a fim de obter dados de entrada mais precisos e completos para o modelo. Então, numa segunda fase, através do modelo apresentado neste trabalho e dos resultados dos ensaios, serão realizados estudos de viabilidade técnica e econômica sobre o sistema de cogeração.



Figura 2.1: Galpão onde está sendo instalado o sistema de cogeração.

O grupo de pesquisa é constituído por professores, engenheiros e alunos da graduação. Os componentes do grupo são:

Professores	Engenheiros	Alunos da graduação
• Ana Rosa M. Primo	• Jacek S. Michalewicz	• Augusto Medeiros
• Fabio Santana Magnani	• Malvino André da Silva Jr.	• Erico Saturnino
• Jorge R. Henriquez Guerrero	• Nazario Rodolfo de Melo	• Newton Prestelo
• José Carlos Charamba Dutra	• Pedro Anselmo Filho	• Rogério Tiné
	• Ravi Ramalho e Souza	
	• Tetsuo Usui	

2.1 Descrição do sistema

A figura 2.2 mostra a planta de cogeração. A microturbina e o grupo gerador são alimentados com o combustível. Os gases de exaustão das duas máquinas saem em direção aos seus respectivos trocadores de calor onde água quente será produzida. Após sair do trocador de calor, os gases de exaustão se deslocam para o tanque armazenador de água quente. A água quente que sai do trocador de calor se desloca para o chiller de absorção que dissipa calor para a torre de resfriamentos e produz água gelada para o ambiente climatizado.

No ambiente climatizado, existe um fan-coil que absorve parte da carga térmica. O excesso de carga térmica é absorvido pela unidade evaporativa do split de compressão. Quando a carga térmica é maior que a soma da potência de refrigeração do Split e do chiller de absorção então a água que vem diretamente do chiller de absorção é acrescida da água proveniente de um termoacumulador de água fria. Quando a carga térmica é menor, parte da água fria do chiller é encaminhada para o tanque de água fria, armazenando a água para uso em outros momentos. As cargas térmicas serão simuladas através de um banco de resistência instalado dentro da câmara climatizada.

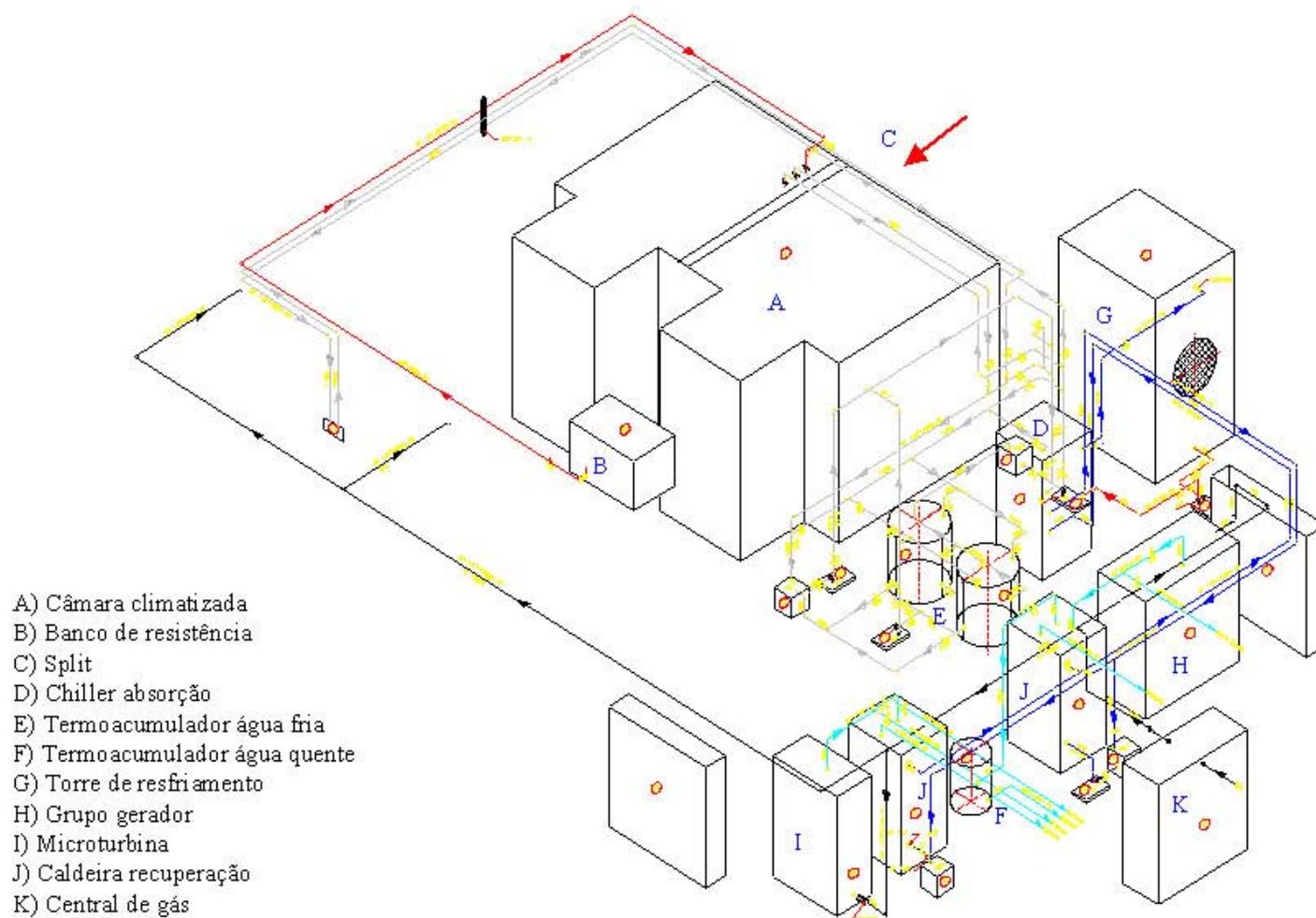


Figura 2.2: Planta do sistema de cogeração do projeto COGENCASA.

Atualmente, o galpão já está construído e todos os equipamentos foram entregues. Na próxima fase, a ser executada até setembro de 2004, serão instaladas as tubulações que permitirão os ensaios dos equipamentos. Em uma última fase, será feita a instalação do sistema de controle que automatizará a planta. Os equipamentos deste sistema de microgeração são apresentados no anexo 1.

2.2 Ensaios do sistema

Para alcançar os objetivos do projeto, foi estabelecida a realização de um conjunto de ensaios no sistema de microgeração operando este apenas com uma máquina térmica de cada vez, em cargas totais e parciais, ou com as duas máquinas térmicas de forma simultânea, também trabalhando com cargas totais ou parciais.

2.2.1 Ensaio 1: Sistema operando apenas com a microturbina.

O ensaio será realizado usando apenas a microturbina e operando com cargas elétricas de 30 kW, 20 kW e 10 kW. Para cada uma destas condições serão realizadas medidas operacionais da própria Microturbina e dos demais componentes do sistema de Microgeração. Entre os objetivos a serem alcançados com estes ensaios tem-se:

- Verificar a faixa de validade para as condições locais das curvas operacionais da microturbina fornecidas pelo fabricante;
- Verificar o efeito das variações de operação da microturbina sobre o sistema de refrigeração (chiller de absorção);
- Verificar o efeito das variações de operação do grupo gerador sobre o sistema de recuperação de calor Unifin;
- Estudar para cada condição de operação da microturbina o efeito na qualidade dos gases de descarga da mesma;
- Verificar a viabilidade econômica do sistema de microgeração para diversas condições de operação.

2.2.2 Ensaio 2: Sistema operando apenas com o grupo gerador.

De forma semelhante ao caso em que o sistema opera apenas com a microturbina, o ensaio será realizado fazendo funcionar o grupo gerador com três cargas diferentes (30 kW, 20 kW e 10 kW). Os objetivos a serem alcançados com estes ensaios serão;

- Verificar o efeito das variações de operação do grupo gerador sobre o sistema de recuperação de calor;
- Estudar, para cada condição de operação do grupo gerador, o efeito na qualidade dos gases de descarga;
- Verificar a viabilidade econômica da utilização parcial do sistema.

2.2.3 Ensaio 3: Estudo no sistema de refrigeração.

Estes ensaios serão realizados objetivando o estudo detalhado do efeito de operação do sistema de microgeração sobre o sistema de refrigeração composto pelo Chiller de absorção. Os ensaios serão realizados com cargas de 60 kW de potência (alcançada fazendo funcionar a Microturbina e o Grupo Gerador em conjunto, ambos sob condições de carga total). Adicionalmente, serão realizados ensaios onde uma das máquinas térmicas irá operar

com carga total e a outra com carga parcial, ou ambas operando com carga parcial, resultando em cargas totais da ordem de 50 kW, 40 kW e 30 kW.

2.2.4 Ensaio 4: Estudo na câmara climatizada

Simular condições de carga térmica visando estudar o comportamento do sistema de refrigeração. Estes ensaios serão realizados impondo cargas térmicas fixas através do uso do banco de resistência dentro da câmara. Durante os ensaios, a energia dissipada pelo banco de resistências equivale a 30 kW elétrico. Dois ensaios serão realizados para atender essa carga térmica.

- Primeiro, com o sistema de Microcogeração atendendo completamente à demanda através do uso do Chiller de absorção em regime de operação ou em conjunto com o Termoacumulador de frio;
- Segundo, com o sistema de Microcogeração atendendo parcialmente a demanda através do uso do Chiller de absorção em regime de operação. O restante da carga térmica não atendida pelo sistema de Microcogeração será suprida por um sistema de refrigeração por compressão (Split).

2.2.5 Ensaio 5: Estudos com o sistema de Termoacumulação

Os ensaios serão realizados em duas etapas. Na primeira etapa será usado o frio gerado no Chiller de absorção para carregar o sistema de Termoacumulação. Posteriormente este frio armazenado será usado para suprir a demanda de frio da câmara através do Fan Coil.

2.2.6 Resumo de medições para realização dos ensaios

Apenas para complementar as informações acima, aqui serão indicadas as grandezas medidas por equipamento e a análise que serão realizadas a partir dessas medidas.

Grupo gerador:

Medições:

- Temperatura do ar na entrada;
- Vazão do ar na entrada;
- Temperatura do gás na entrada;
- Vazão do Gás natural na Entrada;
- Potência Elétrica;
- Temperatura dos gases de exaustão;
- Análise volumétrica dos gases de exaustão.

Cálculos:

- Vazão do ar na entrada:
Embora esta informação seja obtida experimentalmente através de medições com o anemômetro de fio quente, também poderá ser calculada via análise volumétrica dos gases de exaustão. Assim, esta informação adicional permitirá avaliar esta metodologia para a estimativa da vazão (será aplicada no caso da Microturbina) e também para uma estimativa da composição química do combustível;
- Análise volumétrica do gás natural: Caso a metodologia para a estimativa da vazão do ar na entrada seja adequada, poderemos estender esta análise para determinar a composição química do gás natural;
- Vazão dos gases;

- Calor liberado durante a combustão;
- Rendimento térmico do motor.

Microturbina:

Medições:

- Temperatura do ar na entrada;
- Temperatura do gás na entrada;
- Vazão do Gás natural na Entrada;
- Potência Elétrica;
- Temperatura dos gases de exaustão;
- Análise volumétrica dos gases de exaustão.

Cálculos:

- Vazão do ar na entrada;
- Vazão dos gases de exaustão;
- Calor liberado durante a combustão;
- Rendimento térmico da Microturbina.

Chiller:

Medições:

- Temperatura de água fria na entrada;
- Temperatura de água fria na saída;
- Temperatura de água quente na entrada;
- Temperatura de água quente na saída;
- Temperatura de água entrada circuito Chiller-Torre de resfriamento;
- Temperatura de água saída circuito Chiller-Torre de resfriamento;
- Vazão água fria;
- Vazão água quente;
- Vazão água circuito Chiller-Torre de resfriamento.

Cálculos:

- Calor no gerador do Chiller;
- Calor no evaporador;
- Calor liberado no condensador;
- Rendimento do Chiller (COP).

Câmara:

Medições:

- Potência elétrica no banco de resistência;
- Temperatura de entrada no Fan Coil;
- Temperatura de saída no Fan Coil;
- Potência elétrica do Split;
- Temperatura na saída do compressor do Split;
- Temperaturas na entrada e saída do evaporador do Split;
- Temperaturas na entrada e saída do condensador do Split.

Cálculos:

- COP do Split;
- Taxa de calor removido pelo Fan Coil;
- Taxa de calor (carga térmica) liberador pelo banco de resistência na Câmara;
- Taxa de calor removido pelo Split;
- Perdas de calor na câmara.

Recuperador de calor da Microturbina:

Medições:

- Temperatura da água na entrada do recuperador;
- Temperatura da água na saída do recuperador;
- Temperatura dos gases na entrada do recuperador;
- Temperatura dos gases na saída do recuperador;
- Vazão da água no recuperador;
- Vazão dos gases (já estimado).

Cálculos:

- Calor recuperado;
- Efetividade do recuperador de calor.

Recuperador de calor do Grupo Gerador:

Medições:

- Temperatura da água na entrada do recuperador;
- Temperatura da água na saída do recuperador;
- Temperatura dos gases na entrada do recuperador;
- Temperatura dos gases na saída do recuperador;
- Vazão da água no recuperador;
- Vazão dos gases (já estimado).

Cálculos:

- Calor recuperado;
- Efetividade do recuperador de calor.

3. MODELAGEM DOS EQUIPAMENTOS

Sistemas de microgeração são especialmente apropriados quando há, simultaneamente, demanda de água fria e/ou quente e demanda elétrica. A intenção inicial quando a modelagem foi realizada era o uso residencial e comercial, onde é necessário o uso de uma estratégia para gerenciar a compra e geração de energia elétrica e a geração de energia térmica. Isto não significa que os equipamentos modelados não possam ser usados na simulação e otimização de grandes instalações industriais, mas, neste caso, normalmente as demandas são bem mais comportadas e/ou previsíveis. Na modelagem realizada, os equipamentos podem ser desconsiderados igualando seus dados de entrada a zero; porém alguns equipamentos não podem ser acrescentados, como uma turbina a vapor com reaproveitamento dos gases de exaustão, por exemplo.

Para exemplificar o modelo, um esquema de sistema de microgeração igual ao do projeto COGENCASA é mostrado neste capítulo (figura 3.1). Nele existem duas máquinas térmicas, um motor e uma microturbina, com capacidade para gerar no máximo 30 kW de energia elétrica cada. A potência máxima do chiller de absorção é de 35 kW e a do chiller de compressão é 14 kW.

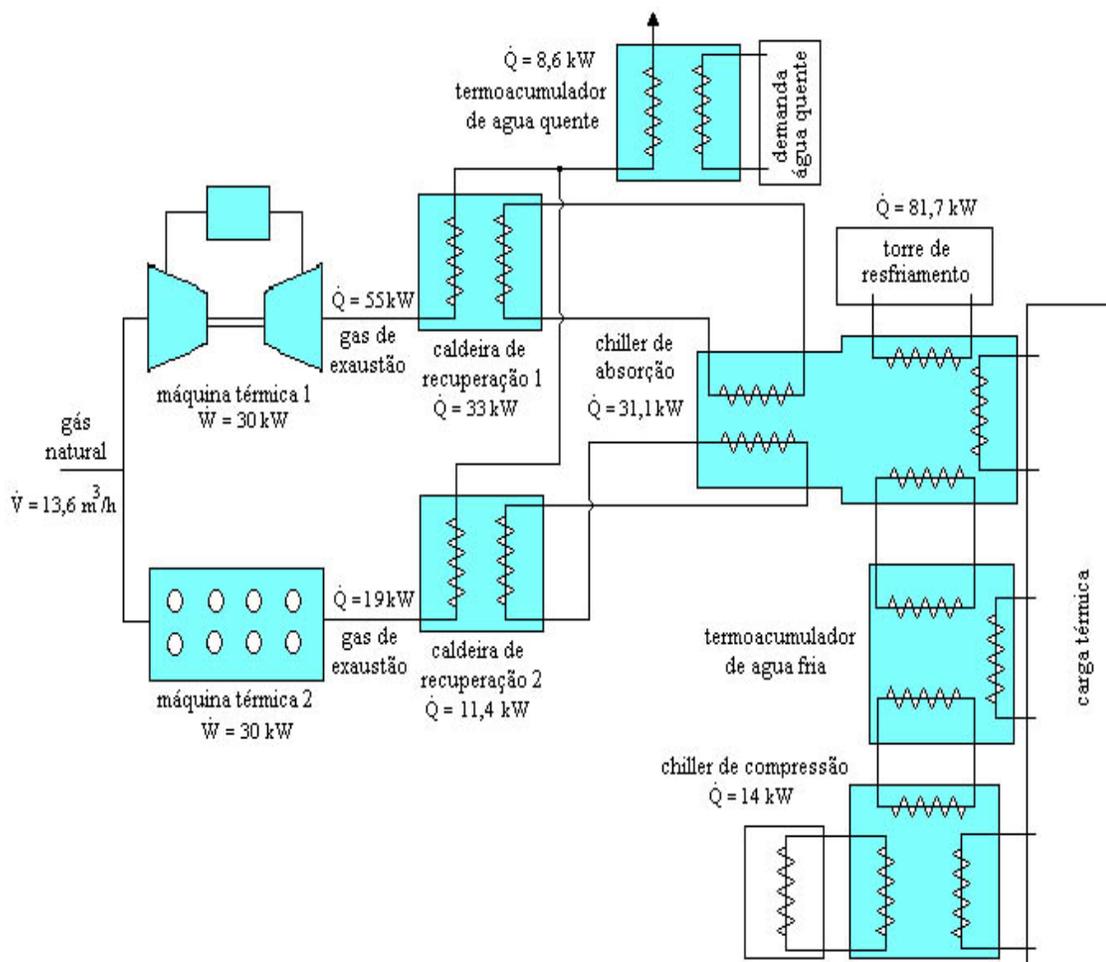


Figura 3.1 – Exemplo de um sistema de cogeração

No exemplo foi usada uma demanda térmica de 100kW e uma demanda elétrica de 120 kW. Como as demandas térmica e elétrica são variáveis ao longo do dia, cada uma com um perfil diferente, os dados apresentados correspondem a um horário escolhido no qual todos equipamentos estavam funcionando com toda capacidade. Como a demanda elétrica é bem

superior à capacidade das máquinas térmicas de gerar energia, cada uma forneceu 30 kW e o restante foi comprado da rede elétrica de distribuição. A alimentação de combustível das duas máquinas térmicas (a soma) foi de aproximada de 13,6 m³/h. A energia térmica utilizável a partir dos gases de exaustão foi de 55 kW para a microturbina e 19 kW para o grupo gerador, mostrando dois comportamentos distintos, pois a microturbina utiliza uma quantidade de ar para a queima do combustível bem superior ao grupo gerador, além disso, boa parte da energia térmica do grupo gerador é retirada pelo sistema de arrefecimento. Devido a estas diferenças, a quantidade de calor que cada caldeira de recuperação consegue disponibilizar em forma de água quente para o chiller de absorção é bem maior na caldeira da turbina (33 kW) que na caldeira do grupo gerador (11,4 kW).

Por fim, o chiller de absorção gera 31,1 kW de potência frigorífica e, como esta capacidade é inferior à demanda térmica, o chiller de compressão também entra em operação com toda a sua capacidade (14 kW). A diferença entre a demanda térmica e a potência de refrigeração dos dois chillers deve ser provida pelo termoacumulador de água fria. A potência de refrigeração disponível no termoacumulador deve ser fornecida pelo chiller de absorção nos momentos em que as máquinas térmicas estão ligadas e a produção total de frio (compressão mais absorção) é superior a demanda térmica de frio. A torre de resfriamento recebe o calor rejeitado pelos chillers (81,7 kW) e os envia para atmosfera. A demanda de água quente é suprida pelo termoacumulador de água quente (8,6 kW).

A modelagem dos equipamentos é apresentada em forma de diagramas de blocos e cada equipamento encontra-se separado formando vários subsistemas. O sistema de cogeração possui duas máquinas térmicas, duas caldeiras de recuperação, um termoacumulador para água quente e um para água fria, um chiller de compressão e um de absorção, sendo estes dois últimos constituídos em um mesmo bloco. Cada um dos blocos verdes (figura 3.2) representa um dos elementos do sistema de cogeração. Do lado esquerdo de cada um destes blocos estão os dados de entrada e do direito os dados de saída. Os dois blocos mais a esquerda são as duas máquinas térmicas e seguindo a direita vêm as duas caldeiras de recuperação, o termoacumulador de água quente e na extremidade direita, na parte superior o termoacumulador de água fria e na inferior os chillers de absorção e compressão. Cada subsistema faz uso de dados que podem ser constantes ou variáveis, provenientes de outros módulos, outros subsistemas, ou até mesmo de um arquivo externo do Matlab. As análises termodinâmicas utilizadas em cada componente do sistema são clássicas, como em Bejan (1998) ou Stoecker (1989).

Cada máquina térmica possui sete entradas de dados constantes provenientes de um arquivo externo e um dado (potência elétrica gerada) proveniente do módulo de configuração de tarefas, que é determinado de acordo com o posicionamento de chaves que fornece o comportamento do equipamento e da carga elétrica. As duas máquinas térmicas possuem duas saídas de dados cada, a massa dos gases de exaustão e a vazão volumétrica de combustível.

Os gases de exaustão de cada uma das máquinas térmicas passam por uma válvula controlada pelo módulo de configuração de tarefas (descrito no capítulo 4) até chegar às caldeiras de recuperação. Além deste dado de entrada, as duas caldeiras recebem mais sete constantes cada uma, provenientes de um arquivo externo; possuem dois dados de saída, calor trocado e temperatura de saída dos gases, sendo o primeiro usado nos chillers e o segundo no termoacumulador de água quente.

O termoacumulador de água quente possui como dados de entrada a temperatura e a vazão mássica dos gases provenientes de cada caldeira de recuperação, a vazão mássica de água a ser aquecida para consumo, calor específico, a temperatura de entrada e a temperatura desejada da água, todas estas agrupadas na variável de entrada 14 (figura 2.1) proveniente do módulo de cargas e demandas. A saída do termoacumulador é o consumo elétrico para aquecimento da água quente.

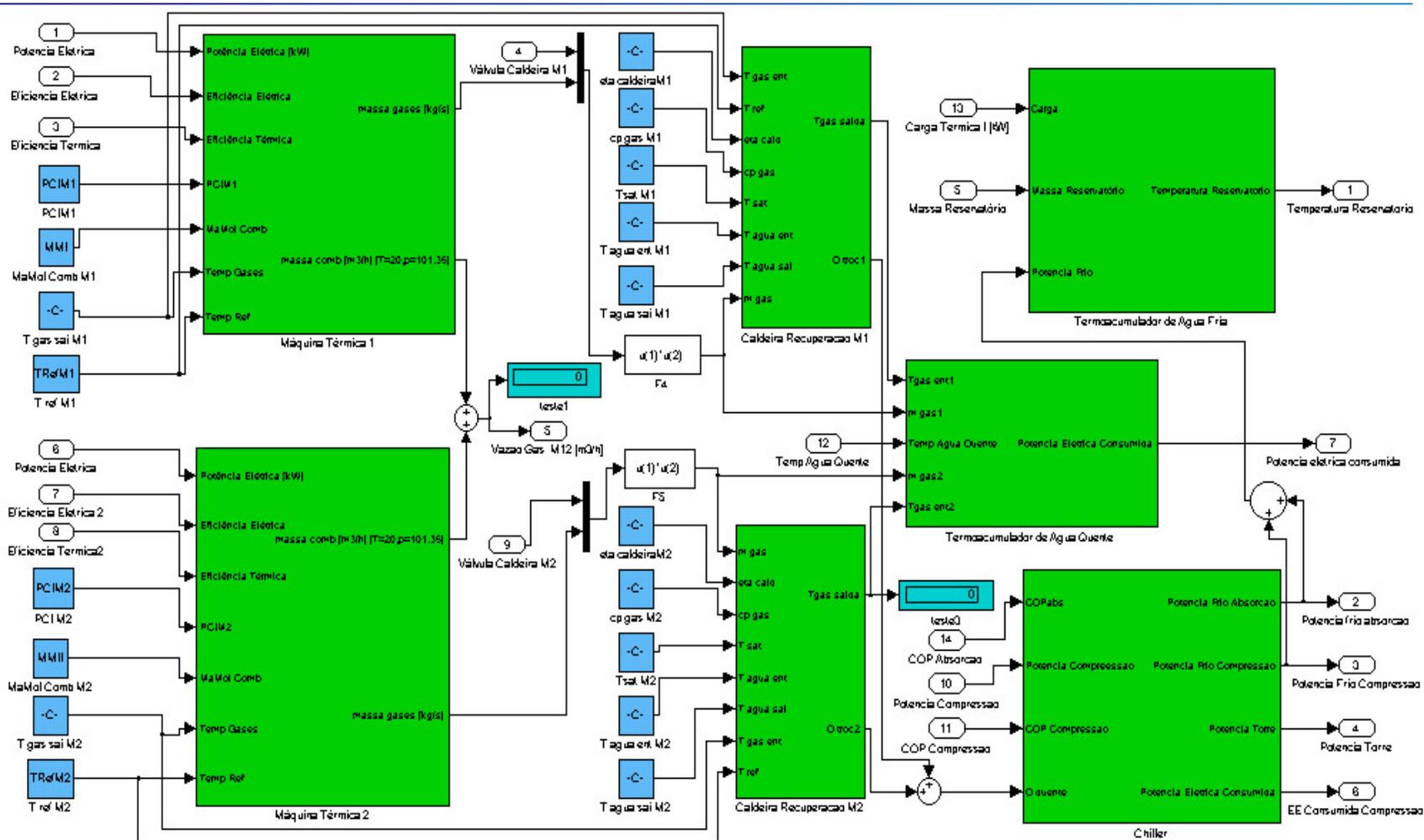


Figura 3.2 – Sistema de cogeração. Representação dos fluxos de massa/ energia entre as duas máquinas térmicas, seus aquecedores/ caldeiras, o sistema de chillers (agrupados, um de absorção e um de compressão) e o acumulador de frio (com ou sem mudança de fase).

O chiller de absorção e o de compressão possuem como entrada os seus respectivos COPs (coeficiente de performance) vindos do arquivo externo, a potência térmica da água quente obtida nas duas caldeiras de recuperação e a potência do chiller de compressão proveniente do módulo de configuração de tarefas. A saída de dados consiste na potência de refrigeração gerada pelo chiller de absorção e de compressão que será usada no termoacumulador de água fria, o consumo de energia do chiller de compressão e a potência da torre de resfriamento.

O termoacumulador de água fria possui como dado de entrada a massa de água total do reservatório, a soma das potências de frio geradas pelos chillers de absorção e compressão e a demanda térmica de frio proveniente do módulo de cargas e demandas. A saída do termoacumulador é a temperatura do mesmo.

O sistema de cogeração como um todo, tem como saída de dados a vazão volumétrica do GN consumido pelas máquinas térmicas, a potência térmica gerada pelo chiller de compressão, a potência da torre de resfriamento, a temperatura do termo acumulador de água fria, a potência térmica gerada pelo chiller de absorção, a potência elétrica consumida pelo chiller de compressão e a potência elétrica consumida no termo acumulador de água quente.

3.1 Máquinas Térmicas

As máquinas térmicas são equipamentos usados para a produção de energia elétrica a partir da energia disponibilizada pela combustão de uma mistura de ar mais combustível. As equações envolvidas com este subsistema estão formuladas de forma que podem ser utilizados tanto em motores de combustão interna como turbinas a gás. Na figura 3.3, $u(1)$ é o primeiro sinal de entrada no bloco, $u(2)$ é o segundo, e assim por diante.

Os dados envolvidos com este subsistema são:

Dados de entrada: Potência elétrica da máquina térmica, eficiência elétrica da máquina térmica, eficiência térmica da máquina térmica, PCI do combustível, massa molar do combustível, temperatura dos gases de exaustão, temperatura de referencia da máquina térmica.

Dados de saída: vazão mássica dos gases de exaustão (kg/s), vazão volumétrica do combustível (Nm^3/h) ($t = 20\text{ }^\circ\text{C}$, $p = 101,35\text{ kpa}$).

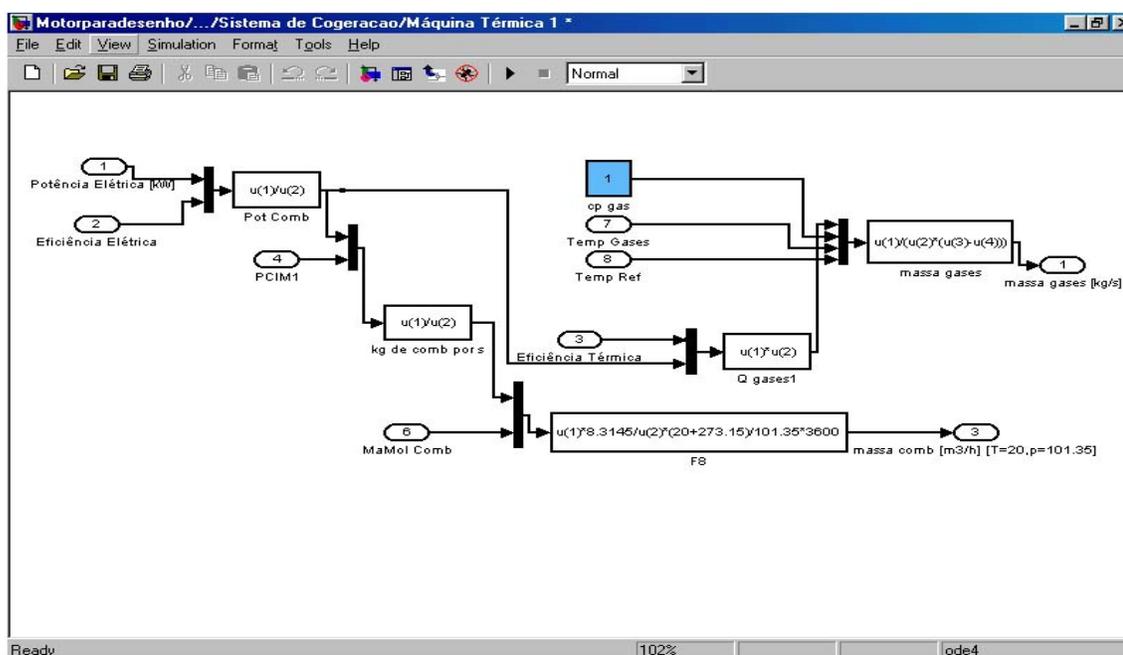


Figura 3.3 – Diagrama da máquina térmica

O cálculo é iniciado através da potência elétrica gerada e da eficiência elétrica da máquina térmica para obter a potência necessária na queima do combustível. A partir da potência do combustível e da eficiência térmica é obtida a energia térmica rejeitada, com a qual se calcula a massa dos gases de exaustão através do calor específico, da temperatura de dos gases de exaustão e da temperatura de referência da máquina térmica.

Com o PCI e a potência do combustível é encontrada a vazão mássica de combustível. Através deste dado, da massa molar do combustível e utilizando a equação de estado dos gases perfeitos para temperatura de 20°C e pressão igual a 101,35 kPa é obtida a vazão em volume de combustível, em Nm³/h.

As equações envolvidas são a potência do combustível, a energia térmica rejeitada, a massa dos gases de exaustão, a vazão mássica de combustível e a vazão volumar de combustível, que seguem adiante seguindo a mesma ordem:

$$W_{Comb} = \frac{W_{El}}{\eta_{El}} \quad (3.1)$$

$$\dot{Q} = \eta_T W_{Comb} \quad (3.2)$$

$$\dot{m}_{gas} = \frac{\dot{Q}}{Cp(T_g - T_{Ref})} \quad (3.3)$$

$$\dot{m}_{Comb} = \frac{W_{Comb}}{PCI} \quad (3.4)$$

$$\dot{V} = \frac{\dot{m}_{Comb} RT}{3600 Mp} \quad (3.5)$$

onde,

Cp – calor específico dos gases de exaustão (kJ/kg K)

M – massa molar do combustível (kg/kmol)

\dot{m}_{Comb} – vazão mássica de combustível (kg/s)

\dot{m}_{gas} – vazão mássica dos gases de exaustão (kg/s)

p – pressão atmosférica (101,35 kPa)

PCI = poder calorífico inferior do combustível (kJ/kg)

R – constante universal dos gases (kJ/kmol K)

\dot{Q} – taxa de transferência de calor (kW)

T – temperatura constante 293,15 K

T_g – temperatura dos gases de exaustão (°C)

T_{Ref} – temperatura de referência (°C)

\dot{V} – vazão volumar de combustível (Nm³/h)

W_{Comb} – potência do combustível (kW)

W_{El} – potência elétrica gerada (kW)

η_{El} – eficiência elétrica da máquina térmica;

η_T – eficiência térmica da máquina térmica;

3.2 Caldeira de recuperação

A caldeira de recuperação é um elemento do sistema com função de reaproveitar parte da energia do combustível que seria jogada na atmosfera pelas máquinas térmicas através dos gases de exaustão. Neste subsistema os gases de exaustão serão controlados e direcionados para as caldeiras de recuperação através de uma válvula. Embora o modelo seja geral (produção de vapor ou água quente), nos casos estudados neste trabalho as caldeiras serão utilizadas apenas para gerar água quente.

Os dados envolvidos com este subsistema são:

Dados de entrada: Temperatura de entrada dos gases de exaustão, temperatura de referência da máquina térmica, eficiência térmica da caldeira, massa dos gases de exaustão, calor específico dos gases de exaustão, temperatura de saturação da água, temperatura de entrada da água, temperatura de saída da água, calor específico da água, calor específico de vapor da água, entalpia de líquido e do vapor da água.

Dados de saída: temperatura de saída dos gases de exaustão, calor trocado dos gases de exaustão.

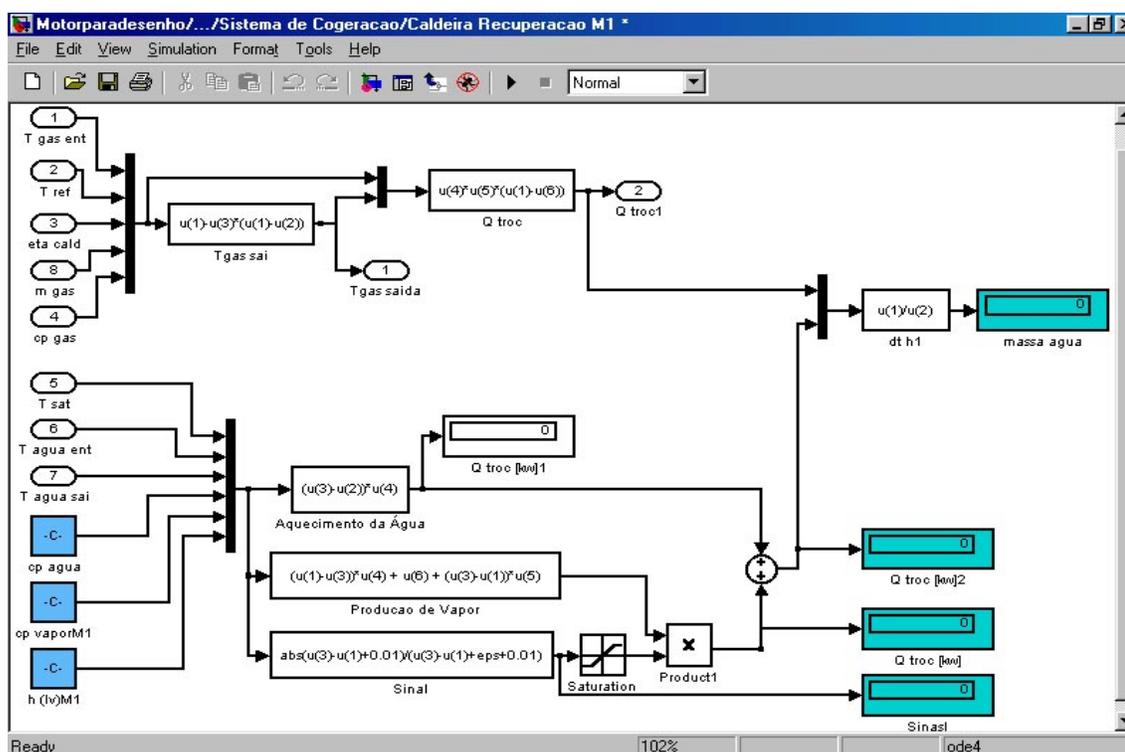


Figura 3.4 – Caldeira de recuperação da máquina térmica.

Neste subsistema existem dois tipos de análise (figura 3.4), a primeira sobre os gases de exaustão e a segunda sobre a água. Na primeira, através dos dados de entrada: temperatura dos gases de exaustão na entrada da caldeira, temperatura de referência da máquina térmica e a eficiência térmica da caldeira, é obtida a temperatura dos gases de exaustão na saída da caldeira e a partir desta temperatura é obtido o calor trocado com a água da caldeira.

Na segunda parte (blocos inferiores), não existe dado de saída, porém nela pode ser avaliada a vazão de água ou vapor. A estrutura dos blocos permite a simulação automática de aquecedores de água (quando a temperatura de saída é menor que a temperatura de saturação) ou geradores de vapor (quando a temperatura de saída é maior ou igual à temperatura de saturação).

As equações envolvidas são a temperatura dos gases de exaustão na saída da caldeira, o calor trocado com os gases de exaustão da máquina térmica, o calor trocado por unidade de

massa se houver apenas líquido, o calor trocado por unidade de massa se houver vapor ou mistura de líquido mais vapor, sinal para o cálculo do calor real trocado e massa de água da caldeira de recuperação que seguem adiante seguindo a mesma ordem:

$$T_{gS} = T_{gE} - \eta_c (T_{gE} - T_{Ref}) \quad (3.6)$$

$$Q_g = m_g C p_g (T_{gE} - T_{gS}) \quad (3.7)$$

$$q_L = C p_{agua} (T_{aS} - T_{aE}) \quad (3.8)$$

$$q_V = C p_{agua} (T_{sat} - T_{aS}) + h_{lv} + C p_v (T_{aS} - T_{sat}) \quad (3.9)$$

$$S = \begin{cases} 1 & \text{se } \left(\frac{T_{aS} - T_{sat} + 0,01}{T_{aS} - T_{sat} + eps + 0,01} \right) \geq 1 \\ 0 & \text{se } \left(\frac{T_{aS} - T_{sat} + 0,01}{T_{aS} - T_{sat} + eps + 0,01} \right) < 1 \end{cases} \quad (3.10)$$

$$m_{agua} = \frac{Q_g}{q_L + S q_V} \quad (3.11)$$

Onde,

$C p_{agua}$ – calor específico da água (kJ/kg K)

$C p_g$ – calor específico dos gases de exaustão (kJ/kg K)

$C p_v$ – calor específico do vapor de água (kJ/kg K)

eps – valor mínimo usado pelo Matlab para evitar a divisão por zero

h_{lv} – entalpia de líquido-vapor (kJ/kg)

m_{agua} – massa de água da caldeira (kg/s)

m_g – massa dos gases de exaustão (kg/s)

Q_g – calor trocado dos gases de exaustão (kW)

q_L – calor trocado havendo apenas líquido (kW/kg)

q_V – calor trocado havendo vapor ou líquido mais vapor (kW/kg)

S – sinal para o cálculo do calor real trocado

T_{aE} – temperatura da água na entrada da caldeira (°C)

T_{aS} – temperatura da água na saída da caldeira (°C)

T_{gE} – temperatura de entrada dos gases de exaustão na caldeira (°C)

T_{gS} – temperatura de saída dos gases de exaustão na caldeira (°C)

T_{Ref} – temperatura de referência da máquina térmica (°C)

T_{sat} – temperatura de saturação da água (°C)

η_c – eficiência térmica da caldeira

3.3 Chiller de Absorção e Compressão

Os chillers de compressão utilizam um compressor mecânico, acionado por um motor elétrico, de forma a aumentar a pressão em determinada fase do seu ciclo termodinâmico.

O que distingue o funcionamento dos chillers de absorção dos chillers de compressão é o fato do primeiro ter como princípio de base um “compressor termoquímico”. Os chillers de absorção permitem produzir água gelada a partir de uma fonte de calor, utilizando para tal

uma solução de um sal como o brometo lítio num processo termoquímico de absorção. Os chillers de absorção, subdividem-se em dois tipos:

- Chiller de absorção de queima direta: nestes sistemas o calor necessário ao processo é obtido queimando diretamente um combustível.
- Chiller de absorção de queima indireta: nestes sistemas o calor necessário é fornecido na forma de vapor de baixa pressão, água quente ou de um processo de purga quente.

Neste subsistema existe apenas o chiller de absorção de queima indireta, que usará como fonte de calor a água quente proveniente da caldeira de recuperação.

Os dados envolvidos com este subsistema são:

Dados de entrada: Potência de compressão, COP de compressão, COP de absorção, potência térmica da água quente de entrada.

Dados de saída: Potência elétrica consumida, Potência de frio do chiller de compressão, Potência da torre de resfriamento, Potência de frio do chiller de absorção.

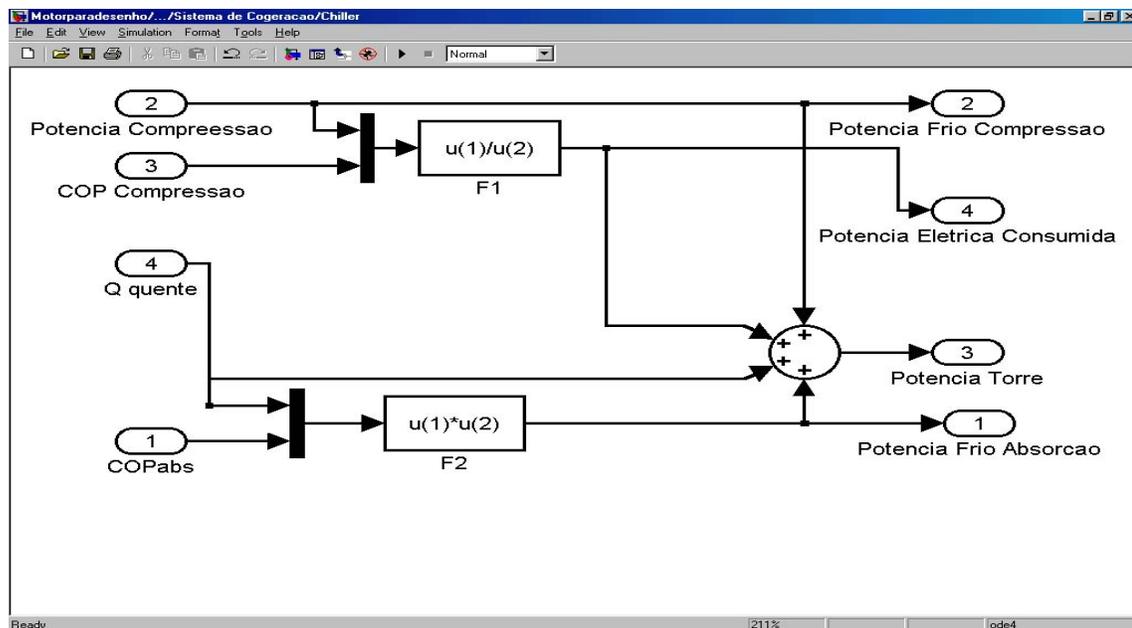


Figura 3.5 – Chiller de absorção e compressão.

Este subsistema possui um chiller de compressão e um de absorção, sendo os dois de COPs constantes. Outro dado de entrada é a potência de compressão que é fornecida pelo módulo de configuração de tarefas e a potência térmica da água quente. Com a potencia de compressão e o COP do chiller de compressão é encontrado a potência elétrica consumida. Com a energia térmica fornecida pelas duas caldeiras de recuperação e o COP do chiller de absorção é encontrada a potência gerada pelo mesmo. A soma de todas estas energias será a energia levada até a torre de resfriamento.

As equações envolvidas são a potência do chiller de absorção, potência elétrica consumida do chiller de compressão e potência da torre de resfriamento, que seguem adiante seguindo a mesma ordem:

$$Q_{Abs} = Q_{quente} COP_{Abs} \quad (3.12)$$

$$W_{el} = \frac{Q_{Comp}}{COP_{Comp}} \quad (3.13)$$

$$Q_{Torre} = Q_{Comp} + W_{el} + Q_{Abs} + Q_{quente} \quad (3.14)$$

Onde,

COP_{Abs} – COP do chiller de absorção

COP_{Comp} – COP do chiller de compressão

Q_{Abs} – potência do chiller de absorção (kW)

Q_{Comp} – potência do chiller de compressão (kW)

Q_{quente} – calor trocado dos gases de exaustão (kW)

Q_{Torre} – potência da torre de resfriamento (kW)

W_{el} – potência elétrica consumida (kW)

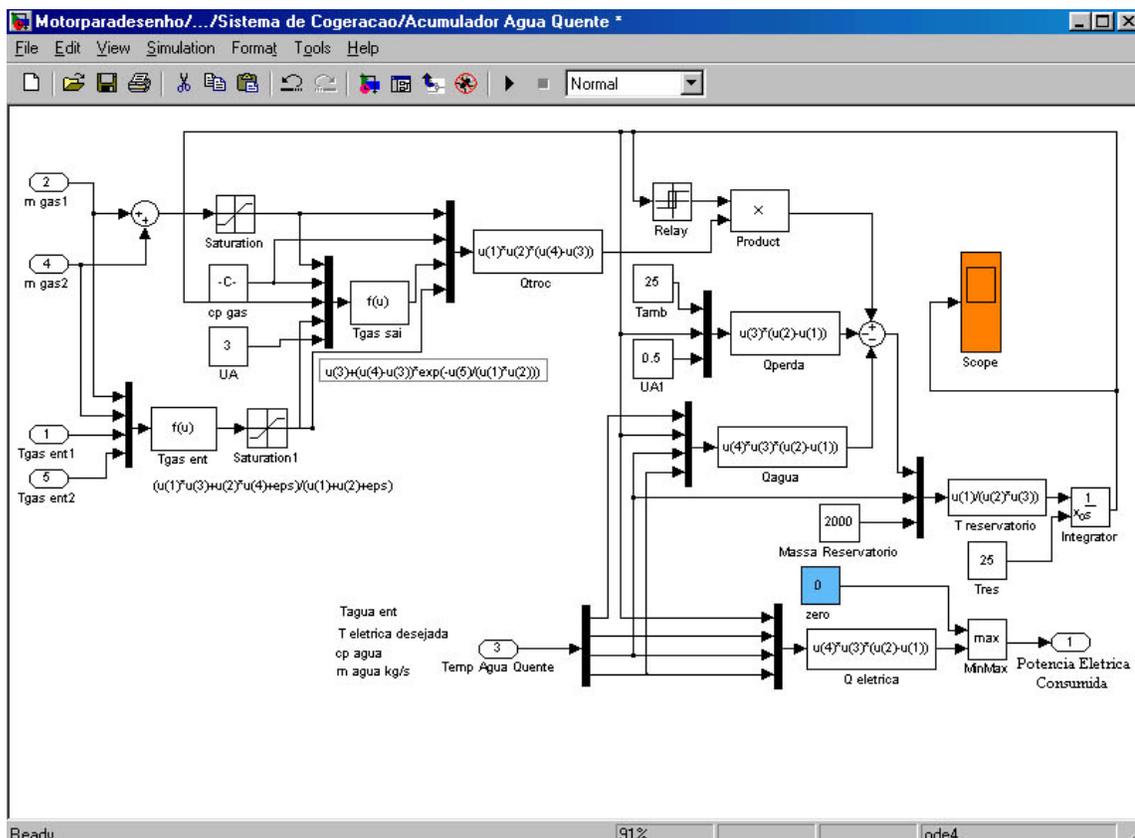
3.4 Termoacumulador de água quente

O termoacumulador de água quente consiste num tanque com uma entrada de água na temperatura ambiente e com uma saída de água quente para ser utilizada de acordo com a demanda. O aquecimento da água é feito pela tubulação que transpassa o termoacumulador e que transporta os gases de exaustão provenientes das caldeiras.

Os dados envolvidos com este subsistema são:

Dados de entrada: Massa de gás de exaustão da maquina térmica 1, massa de gás de exaustão da maquina térmica 2, temperatura do gás de saída da caldeira 1, temperatura do gás de saída da caldeira 2, temperatura desejada da água quente.

Dados de saída: Potência elétrica consumida.



Para calcular o calor trocado no termoacumulador é contabilizada a troca de calor com os gases de exaustão levando-se em consideração as perdas proporcionadas pelo

reabastecimento d'água no tanque e a troca de calor com o meio ambiente. Caso a temperatura da água seja inferior à desejada, há um pós-aquecimento usando resistência elétrica. Caso a temperatura do termoacumulador seja maior que um valor especificado, os gases de exaustão são desviados e lançados diretamente à atmosfera.

O subsistema calcula a potência elétrica necessária para suprir a diferença de temperatura entre o reservatório e a temperatura desejada (figura 3.7).

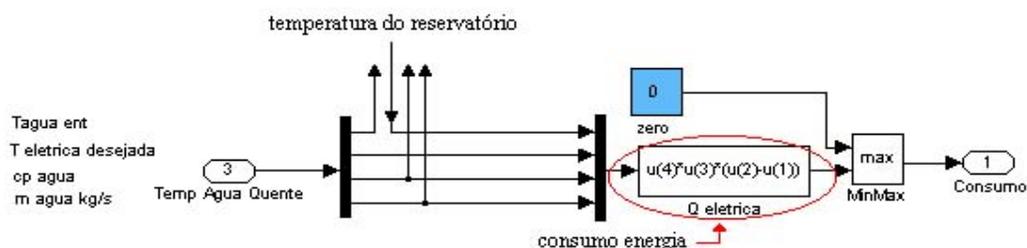


Figura 3.7 – Calculo do consumo de energia.

A temperatura do reservatório é calculada durante todo o tempo através do processo iterativo:

a) Para o início do processo, a temperatura resultante (figura 3.8) será o próprio dado de entrada inicial. O sinal a) seguirá até chegar em um relé (figura 3.9), que tem a função de transformar o sinal em um ou zero (um para temperaturas inferiores ou iguais a 45 °C e zero para acima ou iguais a 47 °C), podendo ocorrer duas possibilidades a.1 ou a.2 (entre 45 e 47°C os gases permanecem desviados ou continuam a ser utilizados de acordo com a temperatura, se ela está subindo ou abaixando).

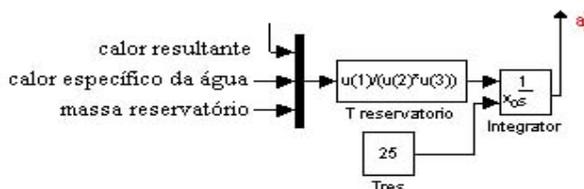


Figura 3.8 – Sinal a).

a.1) Caso o relé seja 1, o resultado é o calor trocado com os gases de exaustão que será somado às perdas por reabastecimento e com o ambiente para gerar a potência térmica resultante.

a.2) Caso o relé seja 0, somente as perdas por reabastecimento e com o ambiente serão contabilizadas para gerar a energia térmica resultante.

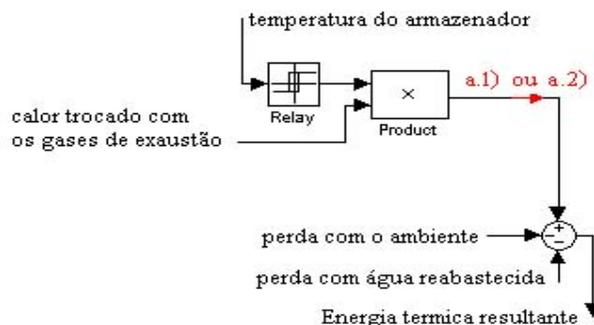


Figura 3.9 – Sinais a.1 e a.2.

b) É calculada a perda de calor com o ambiente através da temperatura ambiente e coeficiente global de transferência de calor multiplicado pela área de contato, e através da temperatura do reservatório (figura 3.10).

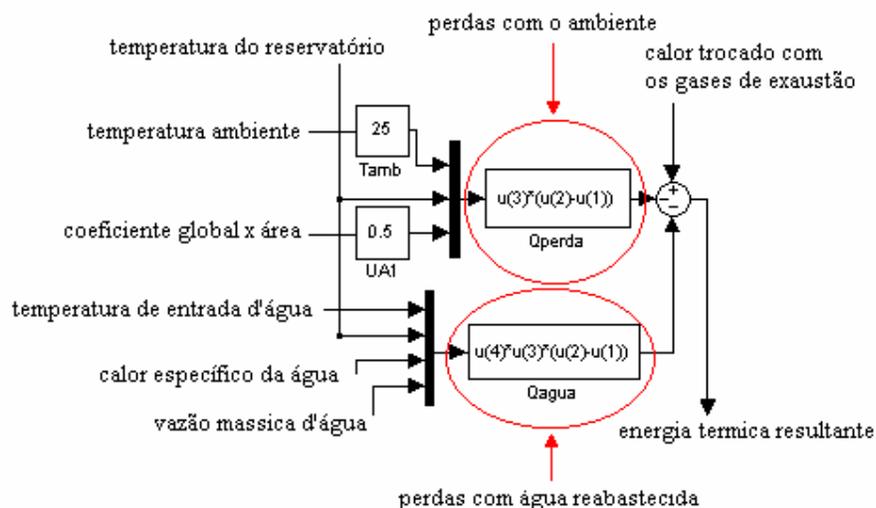


Figura 3.10 – Perdas com ambiente e reabastecimento da água.

c) É calculada a perda com o reabastecimento da água através da temperatura do reservatório e dos dados de entrada: temperatura da água na entrada do termoacumulador, vazão mássica e calor específico d'água (figura 3.10).

d) É calculado o calor trocado entre os gases de exaustão e a água do termoacumulador através da temperatura média de entrada dos gases de exaustão no termoacumulador, da temperatura de saída dos gases de exaustão, da vazão mássica dos gases de exaustão e do calor específico dos gases de exaustão. A temperatura de saída dos gases de exaustão é obtida através da vazão mássica dos gases de exaustão, do calor específico dos gases de exaustão, da temperatura do reservatório, da temperatura média dos gases de exaustão na entrada do termoacumulador e do coeficiente global de transferência de calor dos gases de exaustão multiplicado pela área de troca (figura 3.11).

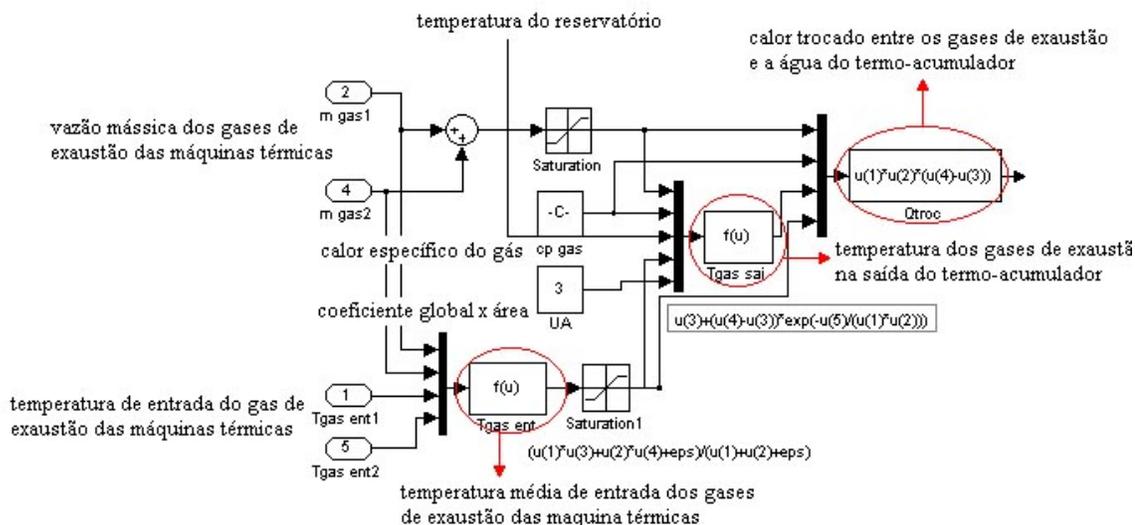


Figura 3.11 – Calor trocado com os gases de exaustão das máquinas térmicas

e) A energia térmica resultante será a soma dos resultados de b), c) e d) se ocorrer a.1 e a soma de b) e c) se ocorrer a.2. Através do calor específico da água, da massa do reservatório e desta energia térmica resultante, é calculada uma diferença de temperatura e em seguida integrada continuamente no tempo. A partir deste ponto o processo é reiniciado.

As equações envolvidas são o consumo de energia elétrica, temperatura do reservatório, energia térmica resultante, perdas com o reabastecimento d'água, perdas com o ambiente, calor trocado com os gases de exaustão das máquinas térmicas, temperatura dos gases de exaustão na saída do termoacumulador e temperatura dos gases de exaustão na entrada do termoacumulador, que seguem adiante seguindo a mesma ordem:

$$Q_{elet} = m_{agua} C_{p_{agua}} (T_{Elet} - T_{Re.s}) \quad (3.15)$$

$$T_{Re.s} = \int_0^t \frac{\dot{Q}_{Tot}}{m_{agua} C_{p_{agua}}} dt + 25 \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_{Tot} = \dot{Q}_{Troc} - \dot{Q}_{Amb} - \dot{Q}_{agua} \quad (3.17)$$

$$\dot{Q}_{agua} = m_{agua} C_{p_{agua}} (T_{Re.s} - T_{agua E}) \quad (3.18)$$

$$\dot{Q}_{Amb} = UA_{Amb} (T_{Re.s} - T_{Amb}) \quad (3.19)$$

$$\dot{Q}_{Troc} = m_{gT} C_{p_{gas}} (T_{gE} - T_{gS}) \quad (3.20)$$

$$T_{gS} = T_{Re.s} + (T_{gE} - T_{Re.s}) e^{\frac{-UA}{m_{gT} C_{p_{gas}}}} \quad (3.21)$$

$$T_{gE} = \frac{m_{g1} T_{gE1} + m_{g2} T_{gE2}}{m_{g1} + m_{g2}} \quad (3.22)$$

Onde,

$C_{p_{agua}}$ – Calor específico da água (kJ/kg K)

$C_{p_{gas}}$ – Calor específico do gás de exaustão (kJ/kg K)

m_{agua} – Vazão mássica d'água no termoacumulador (kg/s)

m_{g1} – Massa dos gases de exaustão da máquina térmica 1 (kg/s)

m_{g2} – Massa dos gases de exaustão da máquina térmica 2 (kg/s)

m_{gT} – Massa total dos gases de exaustão das duas máquinas térmicas (kg/s)

$m_{T_{gas}}$ – Massa total dos gases de exaustão das duas máquinas térmicas (kg/s)

Q_{Amb} – Calor perdido com o meio ambiente (kW)

Q_{agua} – Calor perdido entre a água que chega e a que já está no reservatório (kW)

Q_{elet} – potência consumida pelo banco de resistência elétrica para suprir a demanda térmica (kW)

Q_{Tot} – Calor total que chega ao reservatório (kW)

Q_{Troc} – Calor trocado no trocador de calor (kW)

$T_{agua E}$ – Temperatura da água na entrada do acumulador (°C)

T_{Amb} – Temperatura ambiente (°C)

T_{Elet} – Temperatura desejada (°C)

T_{gE} – Temperatura do gás de exaustão na entrada do trocador de calor (°C)

T_{gE1} – Temperatura do gás de exaustão da máquina térmica 1 na entrada do trocador de calor (°C)

T_{gE2} – Temperatura do gás de exaustão da máquina térmica 2 na entrada do trocador de calor (°C)

T_{gS} – Temperatura do gás de exaustão na saída do trocador de calor (°C)

T_{Res} – Temperatura do reservatório (°C)

UA_{Amb} – Coeficiente global de transferência de calor do ambiente multiplicando a área de troca (kW/K)

UA_{gas} – Coeficiente global de transferência de calor do ambiente multiplicando a área de troca (kW/K)

3.5 Termoacumulador de água fria

O termoacumulador de água fria é um dispositivo para armazenamento de energia térmica na forma de calor latente ou sensível. Este dispositivo permite aumentar a flexibilidade e controle de operação em processos industriais ou em qualquer setor que faça uso extensivo desta energia térmica.

A energia térmica contida nos gases de exaustão é recuperada através da caldeira de recuperação, em seguida é utilizada no chiller de absorção que gerará o frio e direcionará parte para ser usado diretamente e parte para o termoacumulador. No caso do chiller de compressão o frio é produzido diretamente com o uso da energia elétrica. Parte é diretamente consumida e parte é redirecionada para o termoacumulador. Com estes equipamentos, estratégias de armazenamento de energia térmica em sistemas de cogeração permitem um melhor gerenciamento e controle da energia disponível e das cargas térmicas demandadas.

Não foi levada em consideração a equação do trocador de calor (como foi realizado no termoacumulador de água quente) devido a problemas de estabilidade numérica. Para este subsistema é considerada apenas a primeira lei da termodinâmica.

Os dados envolvidos com este subsistema são:

Dados de entrada: Potência de frio, carga térmica, massa do reservatório, temperatura de fusão da água, calor específico da água, calor específico do gelo, entalpia de sólido e líquido do gelo, entalpia de sólido e líquido do gelo, temperatura inicial do reservatório, chave para trabalho acima ou abaixo da fusão.

Dados de saída: Temperatura do reservatório.

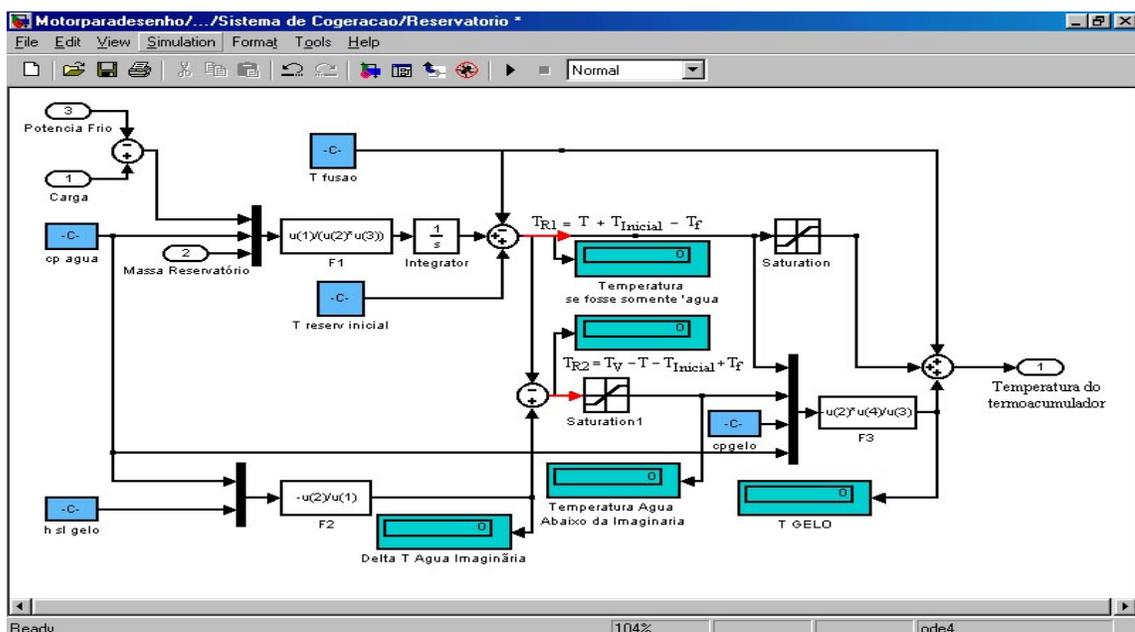


Figura 3.12 – Esquema do termoacumulador de água fria.

No termoacumulador de água fria podem ocorrer três situações distintas dependendo se a temperatura do reservatório está acima, igual ou abaixo da temperatura de fusão da água. Na primeira situação existe apenas água na fase líquida, na segunda coexiste água nas fases sólida e líquida e por último pode ocorrer apenas água na fase sólida.

Primeira situação:

O calor retirado pela potência resultante da diferença entre a carga térmica e a potência térmica gerada pelo chiller de absorção e compressão não é suficiente para provocar mudança de fase no termoacumulador. Desta forma a potência agregada ao subsistema é:

$$\frac{Q_L}{m} = C p_{\text{agua}} \frac{dT}{dt} \quad (3.23)$$

Observando o diagrama de blocos do subsistema, a temperatura T (figura 3.13) é integrada no tempo através da potência resultante mencionada, logo após o bloco F1 (equação 3.24).

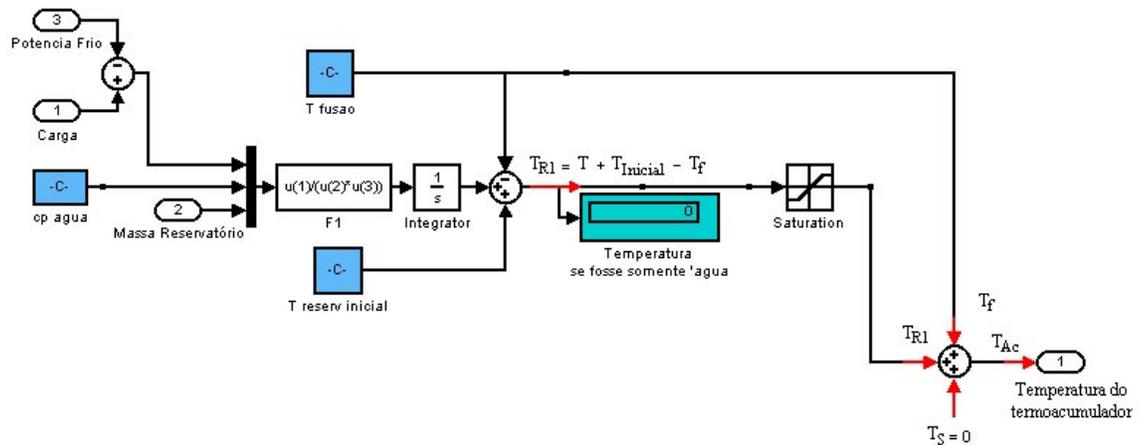


Figura 3.13 – Parte superior do diagrama de blocos do termoacumulador.

$$T = \frac{\int_{t_0}^t Q_L dt}{m C p_{\text{agua}}} \quad (3.24)$$

Em seguida, é somada a temperatura inicial do reservatório e subtraída a temperatura de fusão formando a temperatura T_{R1} (figura 3.13). No final a temperatura de fusão será somada e o bloco saturation 1 transformará a temperatura resultante da parte inferior do sistema em zero (figura 3.12 e 3.13), desta forma a temperatura do termoacumulador será:

$$T_{Ac} = T_{R1} + T_f = T + T_{Inicial} \quad (3.25)$$

Segunda situação:

O calor retirado pela potência resultante da diferença entre a carga térmica e a potência térmica gerada pelo chiller de absorção e compressão é suficiente para iniciar a mudança de fase no termoacumulador, mas não provoca o resfriamento do gelo.

Nesta situação os blocos saturation e saturation 1 retornarão o valor zero fazendo com que a temperatura do acumulador seja a própria temperatura de fusão (figura 3.14)

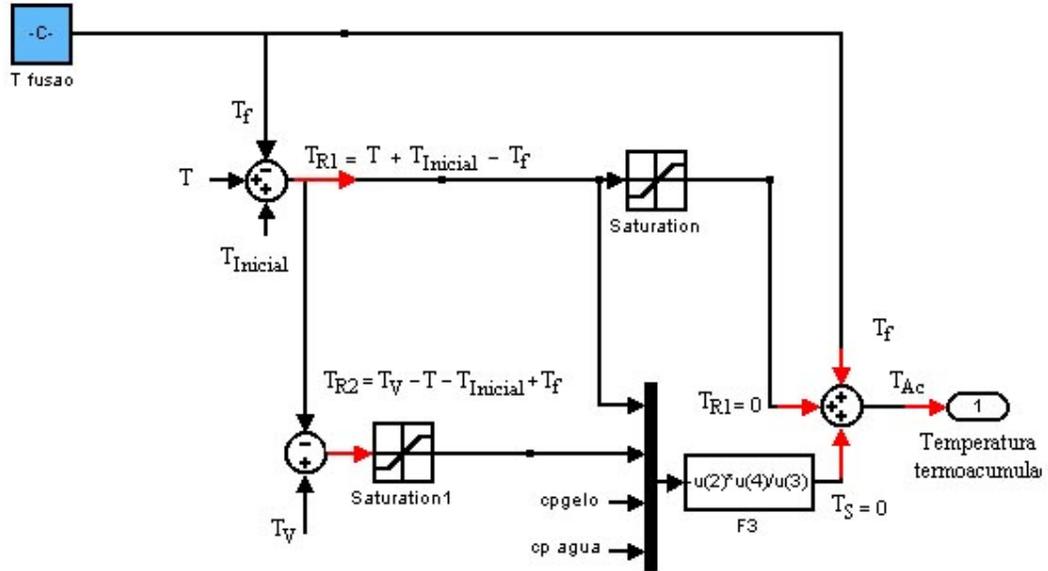


Figura 3.14 – Diagrama de blocos do termo acumulador com resultado da segunda situação.

Terceira situação:

O calor retirado pela potência resultante da diferença entre a carga térmica e a potência térmica gerada pelo chiller de absorção e compressão é suficiente para provocar mudança de fase completa no termoacumulador, ou seja, o gelo começa a ser resfriado. Desta forma o calor arrefecido ao subsistema:

$$\frac{-\int_{t_0}^t Q_L dt}{m} = Cp_{agua} (T_{Inicial} - T_f) + h_{sl} + Cp_{gelo} (T_f - T_{Ac}) \quad (3.26)$$

No bloco F2 é calculada através do calor específico da água e da energia interna de sólido-liquido uma temperatura virtual auxiliar.

$$T_V = -\frac{h_{sl}}{Cp_{agua}} \quad (3.27)$$

Uma temperatura T_{R2} é obtida ao subtrair da temperatura virtual a temperatura T_{R1} . Em seguida T_{R2} é utilizada no bloco F3 junto ao calor específico da água e do gelo formando a equação 3.28.

$$T_S = -T_{R2} \frac{Cp_{agua}}{Cp_{gelo}} \quad (3.28)$$

No passo final (figura 3.15) é somado a temperatura T_S com a temperatura de fusão, enquanto que a temperatura T_{R1} é transformada em zero pelo bloco saturation.

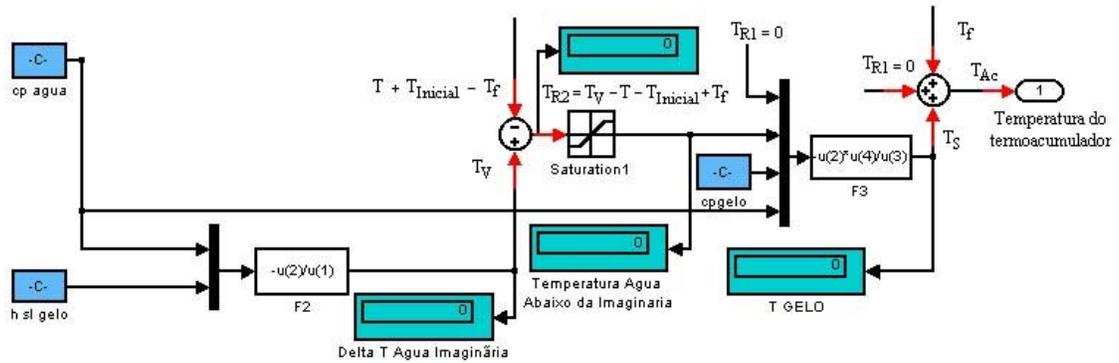


Figura 3.15 – Parte inferior do diagrama de blocos do termoacumulador.

O resultado obtido no último somatório é a temperatura do termoacumulador.

$$T_{Ac} = T_S + T_f = (-T_{R2}) \frac{Cp_{agua}}{Cp_{gelo}} + T_f = -(T_v - T - T_{Inicial} + T_f) \frac{Cp_{agua}}{Cp_{gelo}} + T_f \quad (3.29)$$

Substituindo a equação 3.24 na equação 3.26 e utilizando a equação 3.27 é obtida a equação 3.29 demonstrando que a primeira lei da termodinâmica foi respeitada.

As variáveis e constantes utilizadas nas equações deste subcapítulo são:

Cp_{agua} – Calor específico da água (kJ/kg K)

Cp_{gelo} – Calor específico do gelo (kJ/kg K)

h_{sl} – energia interna de sólido-liquido (kJ/kg)

m – massa total do termoacumulador (kg)

Q_L – Calor retirado ora suficiente e ora insuficiente para provocar mudança de fase (kW)

T – Redução da temperatura devido a Q_L (°C)

T_{Ac} = Temperatura resultante do termoacumulador (°C)

T_f – Temperatura de fusão da água (°C)

$T_{Inicial}$ – Temperatura inicial no termoacumulador (°C)

T_{R1} – Temperatura resultante nos blocos superiores (figura 2.13) (°C)

T_{R2} – Temperatura resultante nos blocos inferiores (figura 2.15) (°C)

T_S – Temperatura quando ocorre mudança de fase (figura 2.15) (°C)

T_v – Temperatura virtual auxiliar (°C)

4. MÓDULO DE CONFIGURAÇÃO DE TAREFAS

Os sistemas de cogeração propiciam o uso racional da energia elétrica e térmica. Contudo, deve haver uma análise na estratégia do uso do sistema de cogeração para que os equipamentos atinjam o resultado ótimo. Esta análise, na forma de utilizar o sistema de cogeração, possui muitas variáveis envolvidas. Para cada uma existe um comportamento e retorno financeiro diferente, o que torna necessário agrupá-las de maneira organizada para que possam ser compreendidas e implementadas. Uma maneira de fazer isto é através de uma tabela de decisões.

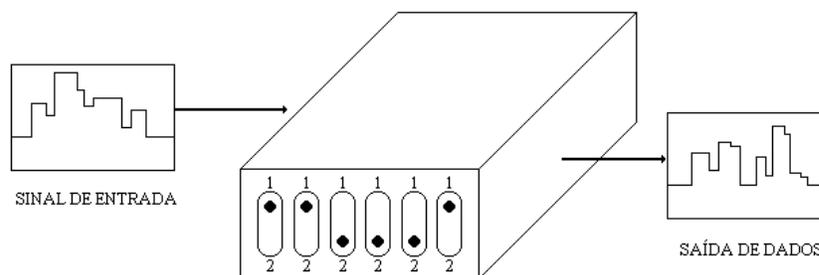


Figura 4.1 – Representação virtual do módulo de configuração de tarefas

Para se implantar um modelo que faça a gestão estratégica dos equipamentos de forma a atender ao perfil e as necessidades de cada projeto, é utilizado um módulo de configuração de tarefas. Nesta seção será mostrado o que é o módulo de configuração de tarefas, como ele foi concebido e como ele pode ser utilizado. No final será apresentado um exemplo, mostrando como uma alteração nas chaves do módulo de configuração de tarefas causa mudanças na forma de operação do sistema e influencia na decisão financeira de investimento a ser tomada.

O módulo de configuração de tarefas é responsável por todas as decisões de operação que o sistema de cogeração pode executar. Sua função é analisar os sinais de entrada e decidir qual valor de potência será comandado para os equipamentos. Pode-se imaginar este módulo como um sistema de controle (figura 4.1), que analisa a demanda elétrica, a carga térmica, a temperatura do termoacumulador de água fria e a capacidade de cada equipamento e, dependendo de como as chaves estão posicionadas, toma a decisão de qual será a geração de energia elétrica pelas máquinas térmicas ou na geração de energia térmica de frio pelos chillers de absorção e de compressão.

O sistema pode ser, então, otimizado a partir de milhões de alternativas que o módulo de configuração de tarefas pode proporcionar. Cada alternativa proporcionará a cada equipamento uma forma de execução diferente de suas tarefas, provocando diferentes formas de atender a demanda elétrica e térmica. É possível, também, a geração de modos de operação que não atendam às necessidades.

Este módulo está localizado no bloco controle, apresentado na figura 4.2, dentro do sistema principal e possui como entrada a potência elétrica máxima e a mínima que cada máquina térmica pode gerar, a potência máxima e mínima do chiller de absorção, a potência máxima e mínima do chiller de compressão, a potência de refrigeração gerada pelo chiller de absorção, a temperatura do termoacumulador de água fria, a carga elétrica e a carga térmica demandada. Seus quatro dados de saída são a energia gerada pelas duas máquinas térmicas, a abertura das duas válvulas utilizadas no desvio ou não dos gases de exaustão descrito na seção anterior, e a potência do chiller de compressão.

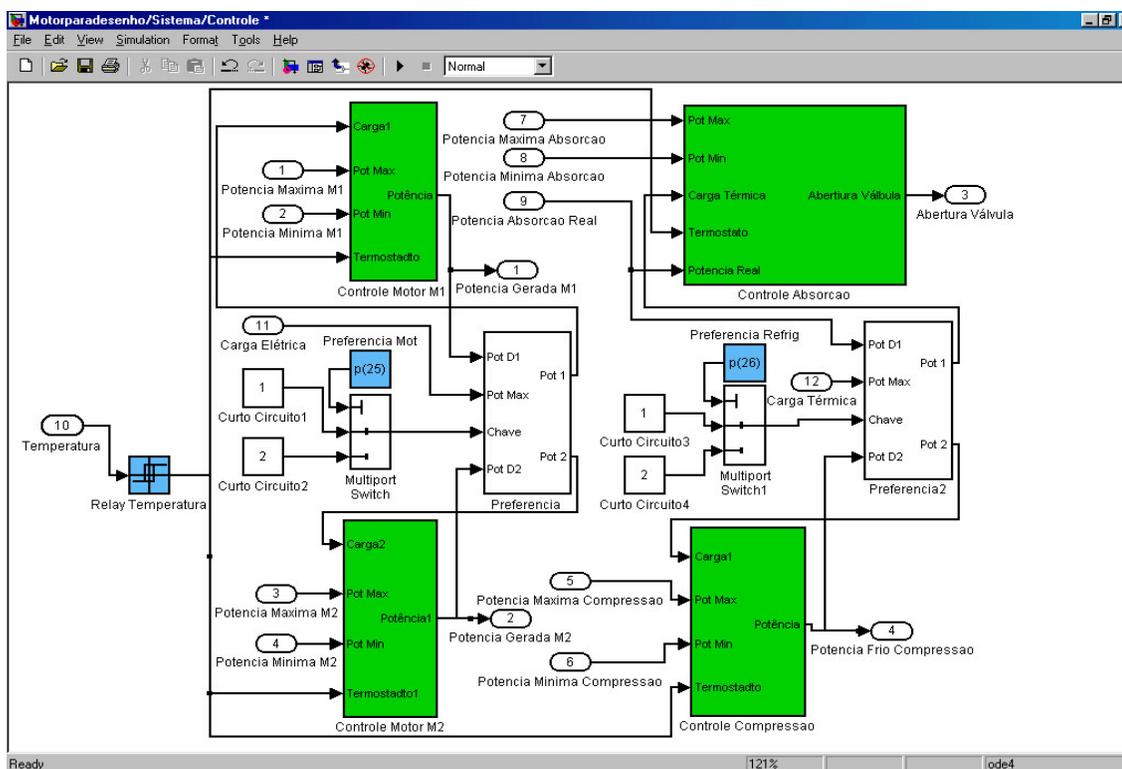


Figura 4.3: Diagrama do controle do sistema de geração de energia elétrica, controle do sistema de refrigeração e controle de preferência de elementos primários e secundários.

Tabela 4.1: Comportamento dos módulos de configuração de tarefas.

TABELA EXPLICATIVA DAS CHAVES					
Chaves				Posição 0	Posição 1
T	M	C	S	Negligencia se está em horário de ponta ou não.	Liga a equipamento no horário de ponta.
1	7	13	19 ^(*)		
T	M	C	S	Negligencia se existe demanda elétrica.	Liga o equipamento na ocorrência de demanda elétrica (T ou M) ou demanda térmica (C ou S).
2	8	14	20		
T	M	C	S	Negligencia se a temperatura do tanque de água fria está acima do mínimo especificado.	Liga o equipamento quando a temperatura do tanque de água fria está acima do especificado.
3	9	15	21		
T	M	C	S	Liga o equipamento durante todo o tempo, sobrepondo as posições das chaves acima.	Mantém a decisão de ligar ou não ou equipamento conforme o posicionamento das chaves acima.
4	10	16	22		
T	M	C	S	Tenta comandar o equipamento a gerar o máximo de energia elétrica (T ou M) ou frio (C ou S) possível.	Tenta modular a geração de energia elétrica conforme a demanda elétrica (T ou M) ou a geração de frio conforme a carga térmica (C ou S).
5	11	17	23		
T	M	C	S	Não permite que a geração de energia elétrica seja maior que a demanda (T ou M) ou que a geração de frio seja maior que a carga térmica (C ou S).	Permite que a geração de energia elétrica seja maior que a demanda (T ou M) ou que a geração de frio seja maior que a carga térmica (C ou S).
6	12	18	24		
Chave 25				A microturbina “percebe” toda a demanda elétrica e o motor “percebe” a diferença entre a demanda elétrica e a potência gerada pela microturbina.	O motor “percebe” toda a demanda elétrica e a microturbina “percebe” a diferença entre a demanda elétrica e a potência gerada pelo motor.
Chave 26				O chiller de absorção “percebe” toda a carga térmica e o split “percebe” a diferença entre a carga térmica e a potência de frio gerada pelo chiller de absorção.	O split “percebe” toda a carga térmica e o chiller de absorção “percebe” a diferença entre a carga térmica e a potência de frio gerada pelo split.
Chave 27				Possibilita 5 posições para escolha do tipo de tarifa elétrica.	

Legenda: T (Turbina), M (Motor), C (Chiller de Absorção), S: (Split)
^(*)No caso do Split, a chave 19, na posição 1, desliga o equipamento no horário de ponta.

Entrando em um dos dois blocos preferenciais (figura 4.3) verifica-se quatro dados de entrada e dois de saída. Como entrada, o bloco preferência recebe duas potências a serem geradas por cada uma das máquinas térmicas, uma demanda elétrica total e uma posição da chave ($P_{(25)}$) que dirá qual das duas potências será utilizada para suprir a demanda elétrica enquanto a outra será usada para suprir o que a primeira não conseguir. O resultado final será a potência que as duas máquinas geram. A mesma operação é realizada para os chillers de absorção e de compressão distinguindo-se apenas nos dados de entrada e de saída.

Como se vê no diagrama do bloco preferência (figura 4.4), a chave multiport switch 1 recebe a demanda elétrica total, a demanda elétrica total menos a potência da máquina térmica 2 e a posição da chave. Se a chave estiver na posição 0 a máquina térmica 1 perceberá a própria demanda e se a chave estiver na posição 1 a máquina térmica 1 perceberá a demanda elétrica total menos a potência a ser gerada da máquina térmica 2. Com a chave multiport switch 2 ocorre o contrário, ela recebe a demanda elétrica total, a demanda elétrica total menos a potência da máquina térmica 1 e a posição da chave, porém, se a chave estiver na posição 0 a máquina térmica 2 gerará a demanda elétrica total menos a potência a ser gerada da máquina térmica 1 e se a chave $P_{(25)}$ estiver na posição 1 a máquina térmica 2 gerará a própria demanda. A mesma operação é realizada no bloco preferência 2 porém a chave é a $P_{(26)}$, os equipamentos são os chillers e a carga é a térmica.

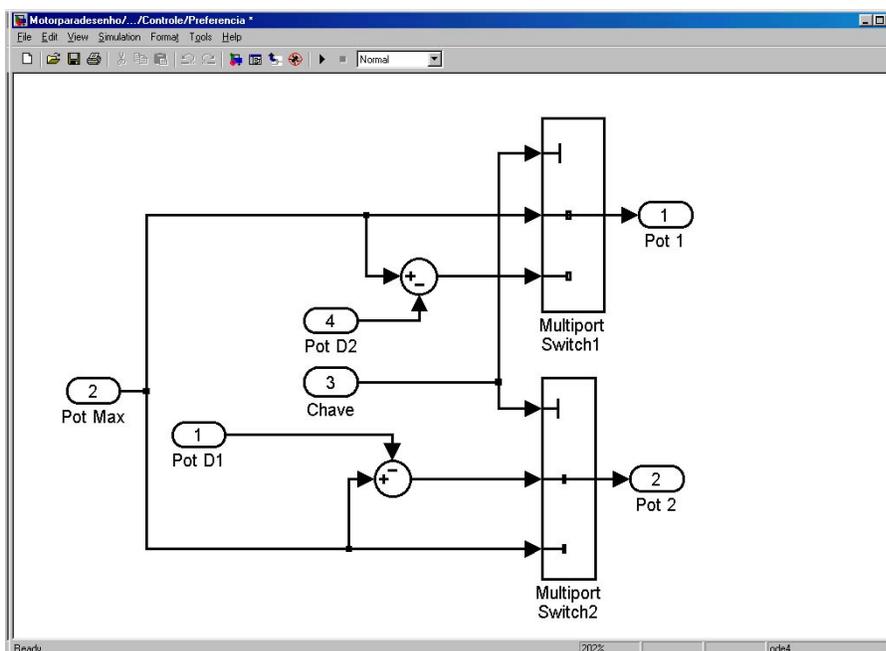


Figura 4.4: Diagrama de escolha do equipamento preferencial.

Entrando agora em um dos equipamentos (figura 4.3), é possível observar as seis chaves de controle (figura 4.5) que podem ser separadas em dois grupos. As chaves dentro do retângulo vermelho são responsáveis por ligar o equipamento ou não e as marcadas pelo retângulo azul decidem, quando o equipamento estiver ligado, qual será o seu comportamento. Isto significa que as chaves $P_{(1)}$, $P_{(2)}$, $P_{(3)}$ e $P_{(4)}$ decidem se o dispositivo está ligado ou desligado (negligenciando ou não o valor da potência comandada), enquanto as chaves $P_{(5)}$ e $P_{(6)}$ decidem o valor da energia gerada quando o dispositivo está decidido para estar ligado.

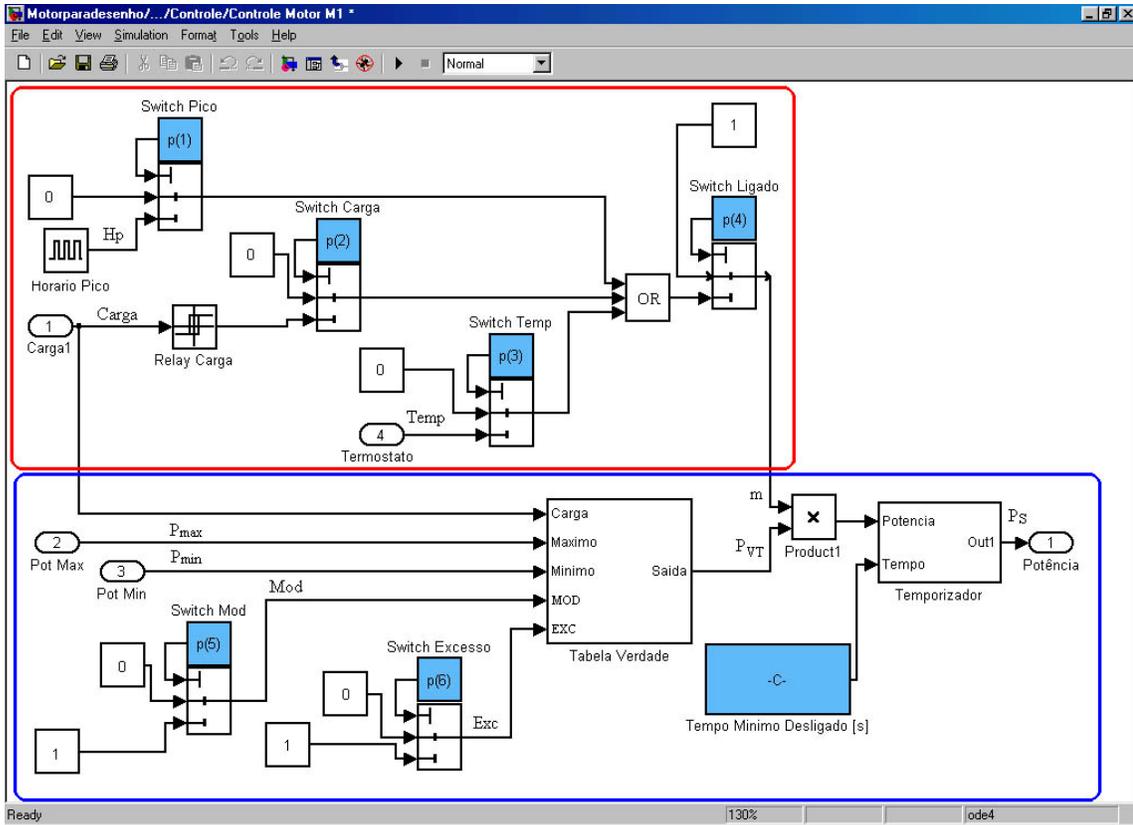


Figura 4.5: Bloco de controle de um dos equipamentos.

Os sinais envolvidos (tabela 4.2) trabalham em conjunto com as chaves, sendo cinco de entrada e um de saída. Para exemplificar, se a chave $P_{(1)}$ está na posição 0, o seu resultado será também 0, porém se está na posição 1 o resultado será o sinal Hp.

Tabela 4.2: Descrição dos sinais de entrada do sistema de configuração de tarefas.

Hp	Um pulso que assume valor 1 quando ocorre o horário de ponta (17:30 – 20:30) e 0 em qualquer período diferente.
Temp	Relé termostático que assume valor 1 se a temperatura é superior à temperatura para o tanque de água fria e 0 para qualquer outra temperatura diferente.
Carga	Sinal que assume o valor da demanda térmica ou elétrica
Pmin	Mínima geração de energia possível para o dispositivo.
Pmax	Máxima geração de energia possível para o dispositivo.
Ps	Geração de energia comandada para o dispositivo.

Analisando a parte superior vermelha do bloco de controle (figura 4.5), através dos valores dos sinais de entrada e das posições das chaves ($P_{(1)}$, $P_{(2)}$, $P_{(3)}$ e $P_{(4)}$) é possível calcular o sinal “m” (equação 4.1), que assume valores 0 ou 1. Neste calculo todas as operações são Booleanas. Se m é igual a unidade, o sistema de configuração de tarefas está comandando o ligamento do dispositivo, se m é igual a zero o dispositivo será desligado.

$$m = P_{(4)} \cdot ((Hp \cdot P_{(1)}) \text{ or } (Carga \cdot P_{(2)}) \text{ or } (Temp \cdot P_{(3)}) \text{ or } (\sim P_{(4)})) \quad (4.1)$$

Onde,

Carga – sinal da carga térmica

Hp – sinal do horário de ponta

m – sinal resultante

$P_{(1)}$ – sinal 1 ou 0 da chave relativa ao horário de ponta

$P_{(2)}$ – sinal 1 ou 0 da chave relativa à carga elétrica

$P_{(3)}$ – sinal 1 ou 0 da chave relativa à temperatura do termoacumulador de água fria

$P_{(4)}$ – sinal 1 ou 0 da chave que liga diretamente o equipamento ou deixa a carga das chaves

$P_{(1)}$, $P_{(2)}$ e $P_{(3)}$.

Temp – sinal da temperatura do termoacumulador de água fria

Uma vez decidido se o equipamento vai operar ou não, a área azul do bloco de controle dos equipamentos (figura 4.5) decidirá de que forma esta geração de energia ocorrerá. A chave $P_{(5)}$ decidirá se o equipamento deve modular com a carga existente ou gerar o máximo possível e a chave $P_{(6)}$ decidirá se o equipamento pode ou não gerar mais que a demanda.

A potência máxima (P_{\max}) e a mínima (P_{\min}) que pode ser gerada pelo equipamento, a carga a ser suprida e os sinais “Mod” e “Exc” (sinais resultantes das chaves $P_{(5)}$ e $P_{(6)}$ respectivamente) entram no dispositivo chamado tabela verdade (figura 4.6).

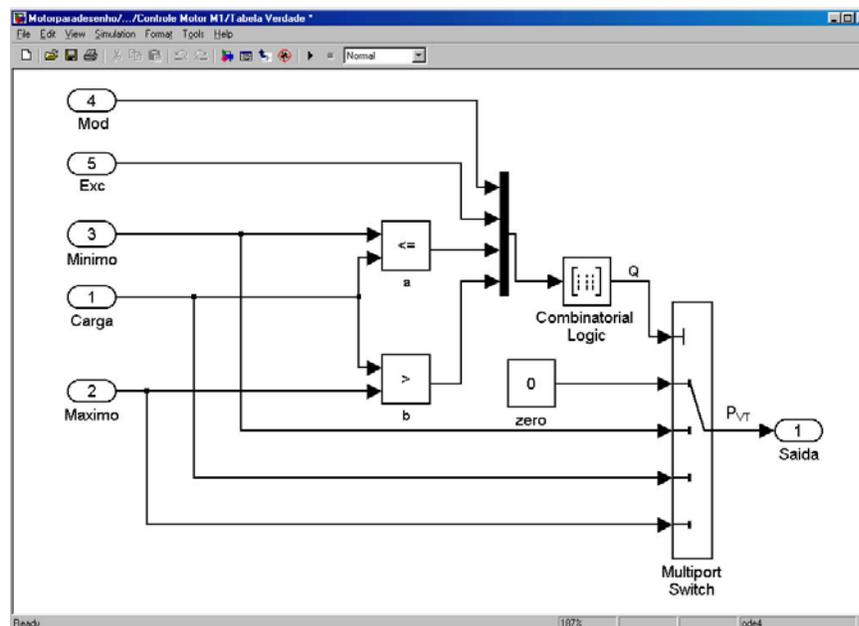


Figura 4.6: Diagrama do bloco tabela verdade.

De acordo com o bloco da tabela verdade, o sinal auxiliar “a” terá valor igual a 1 se a potência mínima que o equipamento pode gerar (P_{\min}) for menor ou igual à carga térmica ou elétrica, do contrário terá valor igual a 0. O sinal auxiliar “b” terá valor igual a 1 se a carga térmica ou elétrica for maior que a potência máxima que o equipamento pode gerar (P_{\max}), do contrário terá valor igual a 0. Pode, então, ocorrer quatro combinações entre os sinais “a” e “b”:

- A carga é menor que a potência mínima e a máxima, logo $a = b = 0$.
- A carga é maior que a potência mínima e menor que a máxima, logo $a = 1$ e $b = 0$.
- A carga é maior que a potência mínima e a máxima, logo $a = b = 1$.
- Existe ainda a combinação $a = 0$ e $b = 1$, porém fisicamente esta opção é impossível de ocorrer. Não pode existir uma carga menor que a potência mínima e maior que a potência máxima.

Uma solução foi escolhida para cada forma possível de agrupamento dos sinais (“Mod”, “Exc”, “a” e “b”) através do sentido lógico que elas significam. É possível uma visualização

completa dos sinais e das soluções escolhidas para cada combinação através de uma tabela esquemática de decisões (tabela 4.3).

Tabela 4.3: Tabela de decisões utilizada para construir a tabela verdade.

		a = 0		a = 1		a = 1	
		b = 0		b = 0		b = 1	
Mod = 0	Exc = 0	carga p_{\min}	maximo	carga >math>p_{\min}</math>	maximo	carga >math>p_{\min}</math>	maximo
	Exc = 1	carga p_{\max}	não excesso	carga p_{\max}	não excesso	carga >math>p_{\max}</math>	não excesso
		0		carga		p_{max}	
Mod = 1	Exc = 0	carga p_{\min}	modula carga	carga >math>p_{\min}</math>	modula carga	carga p_{\min}	modula carga
	Exc = 1	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso
		p_{max}		p_{max}		p_{max}	
Mod = 0	Exc = 0	carga p_{\min}	modula carga	carga >math>p_{\min}</math>	modula carga	carga p_{\min}	modula carga
	Exc = 1	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso
		0		carga		p_{max}	
Mod = 1	Exc = 0	carga p_{\min}	modula carga	carga >math>p_{\min}</math>	modula carga	carga p_{\min}	modula carga
	Exc = 1	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso	carga p_{\max}	excesso
		p_{min}		carga		p_{max}	

Como mostra a tabela esquemática de decisões existem 12 soluções fisicamente possíveis para responder aos sinais de entrada do bloco tabela verdade. O operador “combinatorial logic” (figura 4.6), recebendo quatro sinais de entrada de valor 0 ou 1, cria um sinal de resposta (Q) para cada uma das 16 variações possíveis entre os quatro sinais. As 4 soluções impossíveis de ocorrer recebem como resultado $Q = 1$ e as soluções possíveis recebem como resultado $Q = 1$ ou $Q = 2$ ou $Q = 3$ de acordo com o que é mostrado na tabela de representação da tabela verdade (tabela 4.4).

Tabela 4.4: Tabela verdade do módulo de configuração de tarefas.

Entrada		Mínimo		Carga		Maximo		Saída	Saída final
Mod	Exc	a	b	Mod and Exc and (~a)	$\sim((\sim\text{Mod}) \text{ and Exc})$ and (a e (~b))	$((\sim\text{Mod}) \text{ and Exc})$ or (a e b)	Q	P _{VT}	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	1	0	0	0	0	0	
0	0	1	0	0	1	0	2	carga	
0	0	1	1	0	0	1	3	p _{max}	
0	1	0	0	0	0	1	3	p _{max}	
0	1	0	1	0	0	1	0	0	
0	1	1	0	0	0	1	3	p _{max}	
0	1	1	1	0	0	1	3	p _{max}	
1	0	0	0	0	0	0	0	0	
1	0	0	1	0	0	0	0	0	
1	0	1	0	0	1	0	2	carga	
1	0	1	1	0	0	1	3	p _{max}	
1	1	0	0	1	0	0	1	p _{min}	
1	1	0	1	1	0	0	0	0	
1	1	1	0	0	1	0	2	carga	
1	1	1	1	0	0	1	3	p _{max}	

Por fim, uma chave de multi-entradas (multiport switch) recebe o sinal “Q” e cada resultado deste sinal indica qual porta deve ser usada, gerando o sinal resultante da tabela verdade (P_{VT}) como pode ser visto na tabela de representação da tabela verdade (tabela 4.4) e abaixo:

- $P_{VT} = 0$ (potência gerada igual a zero) se $Q = 0$
- $P_{VT} = p_{\min}$ (potência gerada igual à mínima) se $Q = 1$
- $P_{VT} = \text{carga}$ (potência gerada igual à carga) se $Q = 2$
- $P_{VT} = p_{\max}$ (potência gerada igual à máxima) se $Q = 3$

O sinal “Q” pode ser representado em forma de álgebra Booleana (equação 4.2). O resultado final da tabela verdade (P_{VT}) também pode ser representado desta mesma forma (equação 4.2) e as colunas mínimo, carga e máximo da tabela verdade representada (tabela 4.3) mostram alguns termos desta equação.

$$Q = [\text{Mod and Exc and } (\sim a)] * 1 + \\ +[\sim((\sim \text{Mod}) \text{ and Exc}) \text{ and } (a \text{ and } (\sim b))] * 2 + \\ +[\sim((\sim \text{Mod}) \text{ and Exc}) \text{ or } (a \text{ and } b)] * 3 \quad (4.2)$$

$$P_{VT} = [\text{Mod and Exc and } (\sim a)] * P_{\min} + \\ +[\sim((\sim \text{Mod}) \text{ and Exc}) \text{ and } (a \text{ and } (\sim b))] * \text{carga} + \\ +[\sim((\sim \text{Mod}) \text{ and Exc}) \text{ or } (a \text{ and } b)] * P_{\max} \quad (4.3)$$

Onde,

a – sinal comparativo auxiliar da tabela verdade

b – sinal comparativo auxiliar da tabela verdade

Carga – carga elétrica ou térmica a ser gerada

Exc – sinal resultante da chave $P_{(6)}$

Mod – sinal resultante da chave $P_{(5)}$

P_{\max} – potência máxima possível de ser gerada

P_{\min} – potência mínima possível de ser gerada

P_{VT} – resultado final do bloco tabela verdade igual à potência a ser gerada

Q – sinal obtido do operador “combinatorial logic”

A potência resultante do bloco tabela verdade (P_{VT}) retorna para o bloco de controle do equipamento (figura 4.5) e é multiplicada pelo sinal “m” que indica se o equipamento deve ser ligado ou não. A potência a ser gerada ainda passa por um temporizador que não permite que o equipamento seja ligado logo após ter sido desligado. Após todo este percurso a potência a ser gerada pelo equipamento (P_S) é obtida (equação 4.4):

$$P_S = m P_{VT} \quad (4.4)$$

Onde,

m – sinal resultante que indica se o equipamento será ligado ou não

P_S – potência resultante final a ser gerada pelo equipamento.

P_{VT} – potência que indica o quanto será gerado pelo equipamento

Existe uma peculiaridade com o chiller de compressão. Neste equipamento ocorre uma diferença nas chaves responsáveis pelo sinal “m” (figura 4.7). A chave $P_{(22)}$ influencia da mesma forma que as chaves equivalentes a esta nos outros equipamentos, ou seja, se estiver

na posição 0, $m = 1$, se estiver na posição 1, m dependerá do sinal resultante das três outras chaves. No caso da chave $P_{(22)}$ estar na posição 1 ocorrerá somente uma possibilidade da saída do bloco “min” ser igual a 1. Isto ocorrerá se o sinal ilustrado “A” e “D” forem iguais a 1. Primeiro, para que o sinal ilustrado “D” seja igual a 1 é necessário que o sinal “B” ($P_{(20)} = 1$) ou o “C” ($P_{(21)} = 1$) ou os dois juntos sejam iguais a 1, se isto não ocorrer e se os dois sinais ao mesmo tempo forem zero, a saída do bloco “min” será zero. Segundo, para que o sinal “A” seja igual a 1 é necessário que a chave $P_{(19)}$ seja igual a 0 ou, se estiver na posição 1, que não esteja ocorrendo o horário de ponta.

Esta construção, diferente dos outros equipamentos ocorre para criar a opção do chiller de compressão desligar no horário de ponta independente das outras chaves caso a chave $P_{(19)}$ esteja configurada na posição 1.

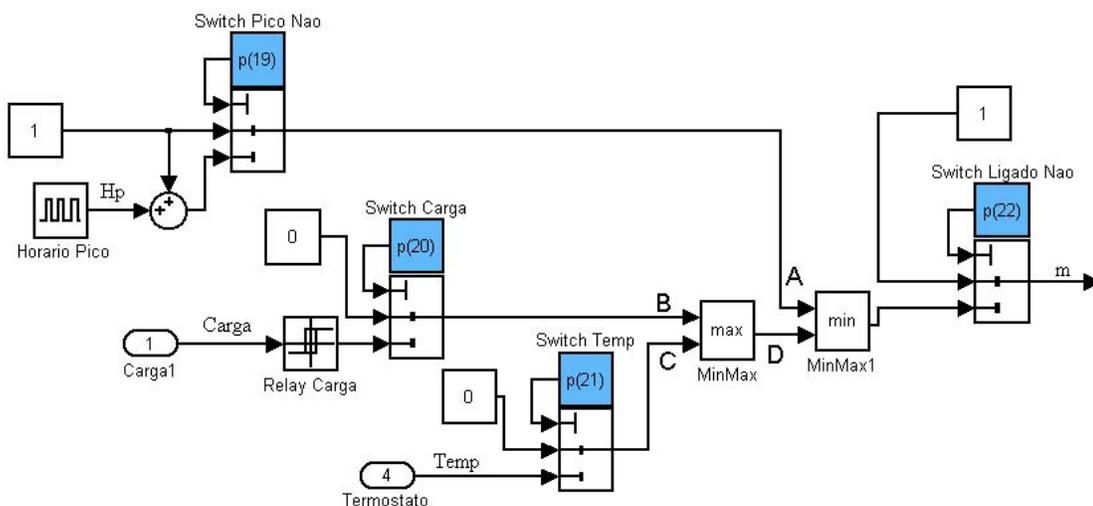


Figura 4.7: diferença do bloco de controle do chiller de compressão.

4.2 Exemplo da utilização do módulo de configuração de tarefas

Apenas para exemplificar o efeito dos estados das chaves do módulo de configuração de tarefas na conduta do sistema, segue um exemplo com dois casos, onde ocorre alteração de apenas uma chave (apesar de ser possível a variação de todas as chaves, lembrando que seria gerado $335.544.320 (2^{26} \cdot 5)$ possibilidades).

A configuração do sistema com suas respectivas potências nominais máximas são:

- Uma microturbina de 30 kW
- Um grupo gerador de 30 kW
- Um chiller de absorção de 22 kW
- Um chiller de compressão de 14 kW

A potência mínima das duas máquinas térmicas é igual a zero, a potência mínima do chiller de compressão é 75% da potência máxima e a potência mínima do chiller de absorção é 50% da máxima.

Os estados de configuração das chaves foram montados em duas tabelas para que fosse possível visualizar as posições de todas as chaves para os dois casos juntos (tabela 4.5 e 4.6). A célula em cinza e com letra em negrito é a única chave que apresenta variação entre os dois casos. A microturbina foi escolhida para ser a máquina primária nos dois casos e no sistema de refrigeração o chiller de absorção é o elemento primário para os dois casos. A chave escolhida para a tarifa de energia elétrica foi a 3 (tarifa azul A4 (13,8 kV)).

Tabela 4.5: Estado das chaves para cada equipamento.

	Microturbina		Grupo gerador		Chiller absorção		Chiller compressão	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Chave a	0	0	1	1	0	0	1	1
Chave b	0	0	0	1	1	1	1	1
Chave c	1	1	0	0	1	1	0	0
Chave d	1	1	1	1	1	1	1	1
Chave e	1	1	0	0	1	1	0	0
Chave f	0	0	1	1	0	0	1	1

Chave a = $P_{(1)}, P_{(7)}, P_{(13)}, P_{(19)}$; chave b = $P_{(2)}, P_{(8)}, P_{(14)}, P_{(20)}$; chave c = $P_{(3)}, P_{(9)}, P_{(15)}, P_{(21)}$; chave d = $P_{(4)}, P_{(10)}, P_{(16)}, P_{(22)}$; chave e = $P_{(5)}, P_{(11)}, P_{(17)}, P_{(23)}$; chave f = $P_{(6)}, P_{(12)}, P_{(18)}, P_{(24)}$.

Tabela 4.6: Estado das chaves de escolha de equipamento preferencial e de tarifa.

	Caso 1	Caso 2
Máquina térmica preferencial $P_{(25)}$	0	0
Sistema de refrigeração preferencial $P_{(26)}$	0	0
Tarifa $P_{(27)}$	3	3

Para os dois casos, a demanda elétrica e a energia elétrica gerada pela microturbina e o grupo gerador foram postos em gráficos (figura 4.8 e 4.9).

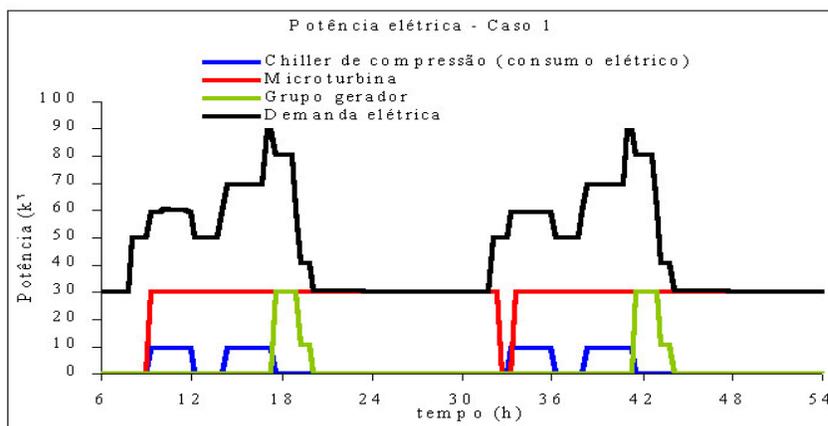


Figura 4.8: Demanda e potência elétrica gerada – caso 1.

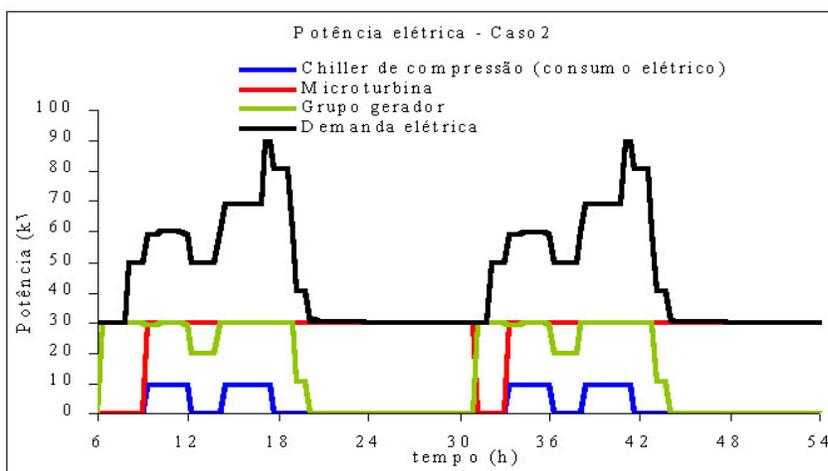


Figura 4.9: Demanda e potência elétrica gerada – caso 2.

Observando o gráfico relativo ao caso 1 (figura 4.8) é possível ver a conduta do grupo gerador ($a = 1$, $b = 0$, $c = 0$, $d = 1$) que foi configurado para ligar sempre que ocorrer o horário de ponta e negligenciar a temperatura do termoacumulador. Para o caso 2 (figura 4.9), a configuração da microturbina é a mesma, mas a do grupo gerador ($a = 1$, $b = 1$, $c = 0$, $d = 1$) foi configurada para ligar toda vez que ocorrer uma nova demanda elétrica (demanda elétrica total menos a energia elétrica gerada pela microturbina), sabendo que a microturbina foi configurada para ser a máquina térmica primária. Nos dois gráficos (figuras 4.8 e 4.9) após as 20:00 horas o grupo gerador é desligado porque a demanda elétrica (30 kW) é igual a energia elétrica gerada pela microturbina. O chiller de compressão ($a = 1$, $b = 1$, $c = 0$, $d = 1$) foi configurado para desligar quando ocorrer o período de horário de ponta.

Nos dois gráficos (figura 4.8 e 4.9) é possível encontrar duas grandes diferenças: O período em que o grupo gerador permanece ligado (de 17:30 às 20:00 e de 41:30 às 44:00 no caso 1 e de 06:00 às 20:00 e de 31:00 às 44:00 no caso 2) e o período que a microturbina permanece desligada (de 32:30 às 33:30 no caso 1 e de 31:00 às 33:00 no caso 2). No caso 1, o módulo de configuração de tarefas do grupo gerador configura este equipamento para ligar apenas no período de horário de ponta. No caso 2 o grupo gerador está configurado para ligar sempre que ocorrer uma nova demanda elétrica (demanda elétrica menos a energia gerada pela microturbina). Como uma consequência, no caso 2, o chiller de absorção trabalha com uma maior potência de refrigeração (maior período de oferta de gases de exaustão da microturbina e do grupo gerador) forçando a temperatura do termoacumulador a alcançar a temperatura mínima antecipadamente (figura 4.10), consequentemente a turbina desliga mais cedo.

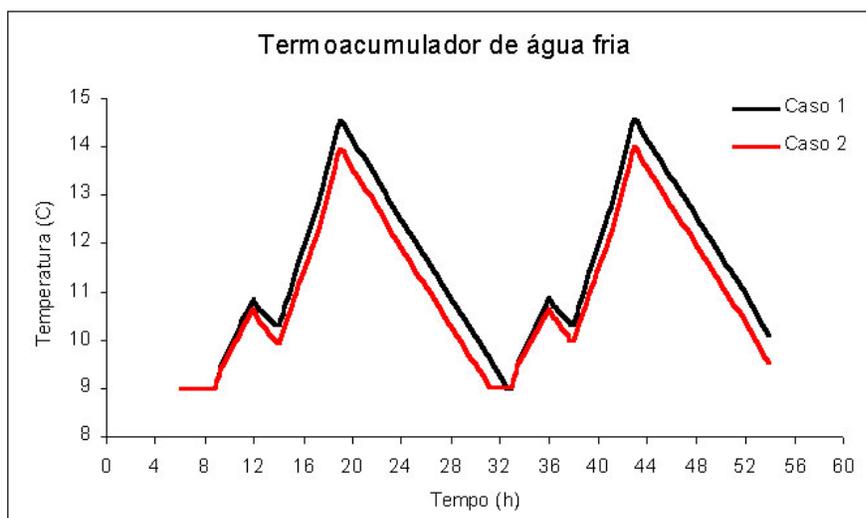


Figura 4.10: Variação diária da temperatura do termoacumulador – caso 1 e caso 2.

A demanda térmica e as potências de refrigeração gerada pelos chillers de absorção e de compressão também foram postos em gráficos para os dois casos (figuras 4.11 e 4.12).

O chiller de absorção está configurado ($a = 0$, $b = 1$, $c = 1$, $d = 1$, $e = 1$, $f = 0$) para ligar se ajustando à demanda sempre que existir carga térmica ou sempre que a temperatura do termoacumulador estiver acima de 9,1 °C, mas somente se for possível alcançar a potência comandada pelo módulo de configuração de tarefas, pois depende da presença de gases de exaustão suficiente proveniente da microturbina e do grupo gerador. O chiller de compressão está configurado ($a = 1$, $b = 1$, $c = 0$, $d = 1$, $e = 0$, $f = 1$) para desligar sempre que ocorrer o horário de ponta e ligar com a potência máxima sempre que existir uma nova demanda térmica. Após 19:00 horas, quando não existe mais demanda térmica, o chiller de absorção permanece ligado porque a temperatura do termoacumulador está acima de 9,1 °C (figura 4.10). Entre 17:30 e 20:30 o chiller de compressão deve desligar porque ocorre o horário de

ponta. Após 20:30 do dia seguinte ele deve desligar porque não existe carga térmica. Entre 19:00 e 20:00 o chiller de compressão deve desligar pelos dois motivos anteriores.

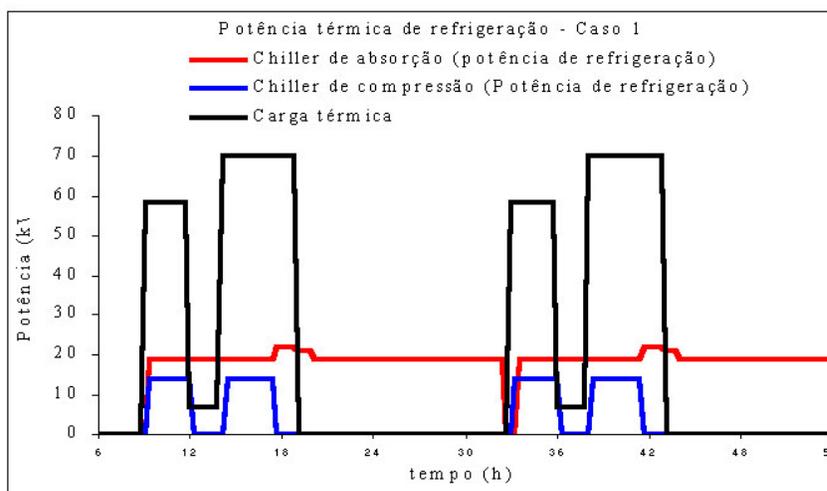


Figura 4.11: Produção e demanda de ar frio – caso 1.

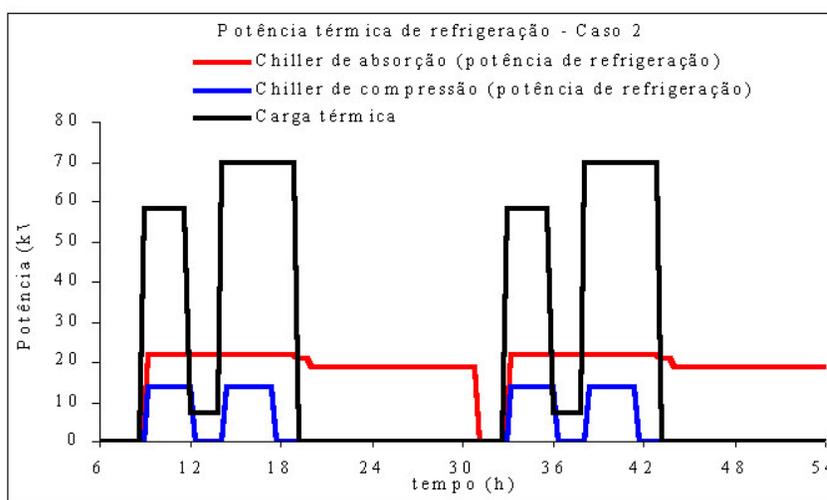


Figura 4.12: Produção e demanda de ar frio – caso 2.

Duas diferenças podem ser notadas entre os gráficos dos dois casos (figura 4.11 e 4.12): A potência total do chiller de absorção durante o período diurno (de 08:30 às 17:30 e de 32:30 às 41:30 no segundo dia) e o tempo desligado do chiller de absorção (32:30 no caso 1 e 31:00 no caso 2). A causa de uma maior potência de refrigeração durante o período diurno no segundo caso é a maior oferta de gases de exaustão. Isto ocorre porque no caso 2 o grupo gerador é ligado de 09:00 às 20:00 em vez de ligar de 17:30 às 20:00 como no primeiro caso. O aumento na potência do chiller de absorção é menor porque a porcentagem de energia que provem dos gases de exaustão do grupo gerador é algo perto de 20% enquanto que a porcentagem na microturbina é acima de 45%. Esta diferença é provocada pela maior eficiência elétrica do grupo gerador. Também no caso da microturbina todo o calor é removido pelos gases de exaustão enquanto que no grupo gerador o calor é removido apenas pelos gases de exaustão (numa situação real, também é possível remover calor pela água de arrefecimento do motor). Como a potência do chiller de absorção é maior durante o período diurno, isto provoca uma menor temperatura do termoacumulador no final do período. Então o chiller de absorção gasta menos tempo para diminuir a temperatura do termoacumulador para a mínima.

Uma tabela financeira está montada com os VPLs (valor presente líquido) dos dois casos estudados e do sistema convencional (tabela 4.7). O sistema convencional não possui nenhuma das duas máquinas térmicas, nem o chiller de absorção e nem o termoacumulador de água fria e o de água quente. O único equipamento existente é o chiller de compressão. No sistema convencional, como não existe termoacumulador de água fria, o chiller de compressão é escolhido com uma potência nominal de refrigeração igual a demanda térmica (70 kW). Como não existe nenhuma máquina térmica, toda a energia é comprada diretamente da rede de distribuição. Observando os VPLs (tabela 4.7), pode-se notar que, para os dados utilizados, a melhor escolha foi o caso 2 por ter o menor VPL. A diferença entre o VPL dos dois casos é de 8%. Outro importante resultado é o maior investimento inicial na opção de cogeração. Esta característica das plantas de cogeração pode tornar proibitivo esta escolha para clientes com dificuldades de obter crédito.

Tabela 4.7: Resultados financeiros do sistema convencional e dos casos estudados.

VPL convencional	U\$ 175.062,00
VPL caso 1	U\$ 178.783,00
VPL caso 2	U\$ 164.145,00
Investimento inicial convencional	U\$ 19.583,00
Investimento inicial cogeração	U\$ 74.177,00

Com este exemplo é possível ter uma idéia da quantidade de informações que o modelo fornece, visto que apenas uma chave foi modificada dentro das 27 chaves existentes gerando dois casos com VPLs e comportamento distintos. Neste trabalho vários estudos de casos ainda serão apresentados de forma a descobrir chaves mais importantes para a determinação do melhor VPL.

5. MÓDULO FINANCEIRO

A otimização realizada pelo programa não constitui uma análise do maior retorno financeiro, e sim no menor dispêndio possível. Não se trata de uma escolha entre realizar ou não o investimento, ele terá que ser realizado com o consumo da demanda elétrica e térmica especificados. Porém, será analisada qual a melhor opção (qual o menor dispêndio) para se realizar tal empreendimento: entre um sistema convencional e o sistema de cogeração. E, dentro do sistema de cogeração, qual a melhor configuração dos equipamentos.

Esta seção apresenta todas as variáveis envolvidas com a questão financeira do sistema de cogeração e do sistema convencional. Apresenta a estrutura tarifária utilizada no modelo, os custos de consumo e de investimento envolvidos, o método de análise financeira utilizado com sua implementação e como estes dados interagem com o sistema.

A análise financeira pode ser realizada através de vários métodos, porém os dados de entrada relativos aos custos envolvidos são de difícil obtenção. Um exemplo disto é a obtenção dos custos de manutenção e dos custos de instalação. Na manutenção de sistemas de cogeração são realizados contratos com empresas especializadas, devido à necessidade destes sistemas receberem manutenção regular, sendo que a variação de preço cobrado por estas empresas é muito alta, além de obedecerem a fatores mercadológicos que variam de acordo com o local de instalação da planta e com os equipamentos envolvidos e as suas capacidades. Os custos de instalação também apresentam variações com fatores mercadológicos das empresas que fornecem este tipo de serviço, porém são de obtenção mais fácil que os custos de manutenção, por somente ocorrer no tempo inicial do fluxo de caixa como um investimento. Os custos de instalação são inseridos pelo usuário, ficando este responsável pela maior aproximação possível com o caso real, e os custos de manutenção do sistema não são contabilizados.

O programa possui duas taxas envolvidas na obtenção da melhor configuração do sistema. A primeira delas é a taxa de juros de mercado que é utilizada para se comparar uma configuração com outra ou comparar uma configuração com o mínimo que se possa esperar dele. A segunda é a taxa de juros de financiamento, visto que grande parte destes investimentos não é realizada com capital próprio.

Estas dificuldades mostram a necessidade de se realizar o projeto cogencasa (capítulo 2), para que se entenda mais como estão envolvidas as variáveis de manutenção, instalação, mercado de crédito entre outras dificuldades existentes na implantação de um sistema de cogeração.

5.1 Tarifas

A energia elétrica pode ser cobrada de diversas maneiras dependendo do enquadramento tarifário do consumidor. As unidades consumidoras são agrupadas inicialmente em dois grupos tarifários, definidos em função da tensão de fornecimento. Se a concessionária fornece energia em tensão inferior a 2300 Volts, caracterizado pela estruturação tarifária monômnia, o consumidor é classificado como do grupo B (baixa tensão), salvo em casos definidos na resolução da ANEEL (Agência Nacional de Energia elétrica) nº 456; se a tensão de fornecimento for maior ou igual a 2300 Volts, caracterizado pela estruturação tarifária binômnia, será consumidor do grupo A (alta tensão), salvo em casos definidos na resolução da ANEEL nº 456.

As tarifas binômias são as de fornecimento aplicáveis ao consumo de energia elétrica ativa e à demanda faturável, enquanto que as tarifas monômias são as de fornecimento aplicáveis unicamente ao consumo de energia elétrica ativa.

O grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2,3 kV (grupo A) está subdividido nos subgrupos A1, A2, A3, A3a, A4 e A5 (tabela 5.1).

Tabela 5.1 – Tensão de fornecimento grupo A

Subgrupo	Tensão de fornecimento
A1	≥ 230 kV
A2	88 kV a 138 kV
A3	69 kV
A3a	30 kV a 44 kV
A4	2,3 kV a 25 kV
AS	Subterrâneo

O grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2,3 kV (grupo B) está subdividido nos subgrupos B1, B2, B3 e B4 (tabela 5.2).

Tabela 5.2 – Tensão de fornecimento grupo B.

Subgrupo	Classificação
B1	Residencial e residencial baixa renda
B2	Rural, cooperativa de eletrificação rural e serviço público de irrigação
B3	Demais classes
B4	Iluminação pública

A maioria das pequenas e médias empresas brasileiras (industriais ou comerciais) enquadra-se no grupo A, onde são cobrados pelo consumo, pela demanda e por baixo fatores de potência. Estes consumidores podem ser enquadrados na tarifa convencional, ou na tarifa horo-sazonal azul ou verde. Os custos por kWh são mais baixos nas tarifas horo-sazonais, mas as multas por ultrapassagem são bem maiores. Assim, para a escolha do melhor enquadramento tarifário (quando facultado ao cliente) é necessária uma avaliação específica.

Na tarifa convencional, o consumidor paga até três parcelas à concessionária: consumo, demanda e ajuste de fator de potência. O faturamento do consumo é independente das horas de utilização no dia e no ano. Acumula-se o total de kWh consumidos e aplica-se uma tarifa de consumo para chegar-se à parcela de faturamento de consumo.

Na tarifa horo-sazonal os dias são divididos em períodos fora de ponta e de ponta, para faturamento de demanda e do consumo e o ano é dividido em um período seco e outro período úmido.

O horário de ponta é definido pela concessionária e composto por três horas diárias consecutivas, exceção feita aos sábados, domingos e feriados, definidos por lei federal. O horário fora de ponta é o período composto pelo conjunto das horas diárias consecutivas e complementares àquelas definidas no horário de ponta.

A subdivisão de períodos úmidos ou secos está relacionada com os períodos onde ocorrem as variações de cheias dos reservatórios de água utilizados para a geração de energia elétrica. Período seco corresponde ao período de sete meses consecutivos. O período úmido corresponde ao período de cinco meses consecutivos.

A tarifa horo-sazonal ainda está dividida em dois tipos: tarifa azul e tarifa verde. Na tarifa horo-sazonal azul o faturamento da demanda será composto por parcelas relativas a cada período: fora de ponta seca ou fora de ponta úmido e ponta seca ou ponta úmida. Na tarifa horo-sazonal verde, o consumidor contrata apenas dois valores de demanda, um para o período úmido e outro para o período seco. Não existe contrato diferenciado para o horário de ponta e o fora de ponta para a demanda.

As tarifas utilizadas no modelo são as fornecidas pela Celpe (Companhia de Energia Elétrica de Pernambuco) em seu endereço eletrônico (www.celpe.com.br). O grupo A é encontrado nas tarifas do tipo azul, demanda e consumo, os subgrupos A1, A3 e A4, com as subdivisões horário de ponta seca, ponta úmida, fora de ponta seca e fora de ponta úmida. Nas

tarifas do tipo verde é enquadrado apenas o subgrupo A4, tipo consumo, com as subdivisões horário de ponta seca, ponta úmida, fora de ponta seca e fora de ponta úmida. Para a demanda (verde) existem apenas duas subdivisões: demanda e demanda ultrapassada. O conjunto de todas estas tarifas utilizadas está disposto na tabela 5.3. A estrutura de tarifas do grupo B não foi utilizada no sistema, pois não constitui um grupo de usuário da cogeração provável.

Tabela 5.3 – Tarifas

Tarifa azul seca A1 consumo fora de ponta
Tarifa azul seca A1 consumo em ponta
Tarifa azul seca A1 demanda em ponta
Tarifa azul seca A1 demanda fora de ponta
Tarifa azul úmida A1 consumo fora de ponta
Tarifa azul úmida A1 consumo em ponta
Tarifa azul úmida A1 demanda em ponta
Tarifa azul úmida A1 demanda fora de ponta
Tarifa azul seca A3 consumo fora de ponta
Tarifa azul seca A3 consumo em ponta
Tarifa azul seca A3 demanda em ponta
Tarifa azul seca A3 demanda fora de ponta
Tarifa azul úmida A3 consumo fora de ponta
Tarifa azul úmida A3 consumo em ponta
Tarifa azul úmida A3 demanda em ponta
Tarifa azul úmida A3 demanda fora de ponta
Tarifa azul seca A4 consumo fora de ponta
Tarifa azul seca A4 consumo em ponta
Tarifa azul seca A4 demanda em ponta
Tarifa azul seca A4 demanda fora de ponta
Tarifa azul úmida A4 consumo fora de ponta
Tarifa azul úmida A4 consumo em ponta
Tarifa azul úmida A4 demanda em ponta
Tarifa azul úmida A4 demanda fora de ponta
Tarifa verde seca A4 consumo fora de ponta
Tarifa verde seca A4 consumo em ponta
Tarifa verde seca A4 demanda
Tarifa verde úmida A4 consumo fora de ponta
Tarifa verde úmida A4 consumo em ponta
Tarifa verde úmida A4 demanda
Tarifa convencional consumo
Tarifa convencional demanda

O cálculo do custo com energia elétrica pode ser realizado a partir da equação 5.1.

$$\begin{aligned}
 custo = & (EC_{CHP} Tarifa_{CHP} + EC_{CFP} Tarifa_{CFP} + \\
 & + P_{\max DHP} Tarifa_{DHP} + P_{\max DFP} Tarifa_{DFP}) * \left(1 + \frac{ICMS}{1 - ICMS} \right) \quad (5.1)
 \end{aligned}$$

Onde,

$custo$ – custo com energia elétrica

EC_{CFP} – energia consumida no horário fora de ponta

EC_{CHP} – energia consumida no horário de ponta
 $ICMS$ – imposto de circulação de mercadorias e serviços
 $P_{\max DFP}$ – potência máxima no horário fora de ponta
 $P_{\max DHP}$ – potência máxima no horário de ponta
 $Tarifa_{CFP}$ – tarifa consumo de energia no horário fora de ponta
 $Tarifa_{CHP}$ – tarifa consumo de energia no horário de ponta
 $Tarifa_{DFP}$ – tarifa demanda de energia no horário fora de ponta
 $Tarifa_{DHP}$ – tarifa demanda de energia no horário de ponta

A estrutura tarifária do gás natural é mais simples. No caso da Copergás a tarifa varia com o consumo diário, para valores acima de 1000 m³/dia e com a categoria (gás natural veicular, industrial, comercial e residencial), porém existe uma instabilidade do preço como ocorreu no ano de 2002, quando houve seis alterações do preço no decorrer do ano. Em virtude destes motivos a tarifa adotada no modelo é única.

A tarifa da venda de energia elétrica é de difícil obtenção, pois depende de fatores mercadológicos e negociações com a concessionária.

5.2 Método de decisão econômica

Para se realizar um estudo de decisão de alternativas econômicas é necessário compará-las a fim de selecionar a mais conveniente. Existem vários critérios para decisão destas alternativas econômicas e seu principal cuidado em comum é o reconhecimento do valor do dinheiro no tempo.

Antes de realizar o estudo do valor do dinheiro no tempo é necessário saber de dois fatores financeiros relativos a financiamento e como eles são utilizados no programa. A carência é um período pós-liberação de recursos, normalmente medido em meses, onde o empresário não amortiza a dívida, apenas paga os juros e a correção monetária. A devolução do principal do financiamento inicia apenas depois de concluído o prazo de carência, no período de amortização. O prazo total de financiamento é medido pela soma dos prazos de carência e amortização. A amortização é o pagamento do financiamento, em prestações fixas, sem considerar os juros e correção monetária referentes. O prazo de amortização é o período que o empresário tem para pagar o montante financiado, diluindo assim o saldo devedor a ser pago em cada prestação. Junto com as prestações de amortização também são cobrados juros e correções geradas pela dívida. No modelo apresentado neste trabalho, o prazo de carência é nulo, e durante a amortização, se paga tanto a dívida quanto os juros.

Quando se deseja investir uma quantia, comparam-se, geralmente, os prováveis dividendos que serão proporcionados pelo investimento com os de outros investimentos disponíveis. A taxa de juros que o dinheiro investido irá proporcionar deverá ser superior a uma taxa prefixada que seria obtida em outros investimentos satisfatoriamente. Esta taxa é a taxa mínima de atratividade e pode também ser conhecida como taxa de expectativa, taxa de equivalência, taxa de interesse ou taxa equivalente de juros. A taxa mínima de atratividade é utilizada nestes critérios para que as opções econômicas possam ser comparadas. Alguns dos principais critérios comumente utilizados são:

- Método do valor uniforme líquido: Em investimentos com séries de receitas e despesas diferentes é possível, a partir do uso de uma taxa mínima de atratividade, transformar as séries de cada investimento em séries uniformes em um mesmo período, permitindo, assim, a comparação entre elas.
- Método do custo-benefício: Neste critério é usada a relação entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos, de forma que os projetos dados à análise pelo

critério serão economicamente viáveis quando este indicador for maior que a unidade, ou no limite, igual a esta, no mínimo.

- Método da taxa de retorno: A taxa interna de retorno é a taxa que torna o valor presente líquido nulo, ou seja, é com esta taxa que a somatória de todas as receitas se torna igual à somatória de todos os dispêndios.
- Método do prazo de retorno: Este critério fornece um número de períodos do fluxo de caixa em questão nos quais a somatória dos benefícios se iguala à somatória dos custos. A maior falha deste método é não se poder classificar alternativas na razão inversa do número de períodos de retorno. Assim, se tivermos duas alternativas “k” e “l” com prazos de retorno respectivamente iguais a 3 e 5 períodos, não se pode afirmar, com segurança, que a alternativa “k” é melhor, em virtude de ter o menor prazo de retorno. A real classificação de alternativas se dá pela existência de maior lucro.
- Método do valor presente líquido: Este método tem como finalidade determinar um valor no instante considerado inicial, a partir de um fluxo de caixa formado de uma série de receitas e dispêndios. Quando se calcula o VPL de um investimento isoladamente (sem comparar com outro investimento), o fato do VPL ser nulo não significa que não se tem lucro, mas significa que o investimento correspondente à taxa mínima de atratividade tem retorno igual ao investimento estudado e o fato do VPL ser negativo pode também significar que o investimento correspondente à taxa mínima de atratividade utilizada tem um retorno maior que o investimento estudado, mas não significa que ele necessariamente ofereça prejuízo.

O método escolhido para verificar o melhor caso possível na otimização do sistema e o melhor caso entre o sistema convencional e o sistema de cogeração, foi o método do valor presente líquido. Devido à estrutura do programa, os outros métodos também podem ser facilmente implementados.

O valor presente líquido de um fluxo de caixa de uma determinada alternativa “j” é a somatória algébrica dos vários valores presentes envolvidos neste fluxo de caixa, ou seja, é a soma algébrica de todos os valores envolvidos (ora receitas, ora dispêndios) nos “n” períodos considerados, reduzidos ao instante considerado inicial através de uma taxa de juros comparativa (equação 5.2).

$$VPL_j = \sum_0^n F_n (1+i)^{-n} \quad (5.2)$$

Onde,

F_n – Cada um dos diversos valores envolvidos no fluxo de caixa e que ocorrem em n.

i – taxa de juros comparativa ou taxa mínima ou de atratividade.

n – número de períodos envolvidos em cada elemento da série de receitas e dispêndios do fluxo de caixa.

VPL_j – valor presente líquido de um fluxo de caixa da alternativa j.

Para que seja calculado o VPL de cada alternativa envolvida com a otimização do sistema é necessário saber a taxa mínima de atratividade, cada receita, cada dispêndio e o período em que eles ocorrem. Para que isto ocorra são realizados três procedimentos:

Primeiro procedimento:

São calculados os custos de investimentos no sistema de cogeração e os custos de investimentos no sistema convencional (equações 5.3 e 5.5), através dos dados de entrada (custos dos equipamentos envolvidos) do arquivo externo inseridos pelo usuário (tabela 5.4). A única receita que pode ocorrer é a venda de energia elétrica para a rede proveniente do excesso de energia gerado pelas máquinas térmicas.

Tabela 5.4 – Planilha de custos.

Custos de investimento	
Custo da máquina térmica um	U\$/kW
Custo da máquina térmica dois	U\$/kW
Custo do chiller de absorção	U\$/kW
Custo do chiller de compressão para sistema de cogeração	U\$/kW
Custo do transformador de 230 kV	R\$
Custo do transformador de 69 kV	R\$
Custo do transformador de 13,8 kV	R\$
Custo dos termoacumuladores em função da massa de água	R\$/kg
Custos de instalação do sistema convencional	R\$
Custos de instalação do sistema de cogeração	R\$
Custos de consumo	
Custo da energia elétrica comprada da rede	R\$/kW
Custo do consumo do gás natural	R\$/m ³

$$C_{COG} = RD(P_{M1} C_{M1} + P_{M2} C_{M2} + P_{ABS} C_{ABS} + P_{COMP1} C_{COMP}) + CI_{COG} \quad (5.3)$$

$$CI_{COG} = m C_t + 10000 \quad (5.4)$$

$$C_{OR} = RD P_{COMP2} C_{COMP} + CI_{OR} \quad (5.5)$$

Onde,

C_{ABS} – custo do chiller de absorção(U\$/kW)

C_{COG} – custo de investimento com o sistema de cogeração

C_{COMP} – custo do chiller de compressão (U\$/kW)

CI_{COG} – custo de instalação no sistema de cogeração (R\$)

CI_{OR} – custo de instalação no sistema de cogeração (R\$)

C_{M1} – custo da máquina térmica 1 (U\$/kW)

C_{M2} – custo da máquina térmica 2 (U\$/kW)

C_{OR} – custo de investimento com o sistema de convencional

C_t – custo do termoacumulador (R\$/kg)

m – massa do termoacumulador de água fria (kg)

P_{ABS} – potência do chiller de absorção (kW)

P_{COMP1} – potência do chiller de compressão (kW)

P_{COMP2} – demanda térmica de frio (kW)

P_{M1} – potência da máquina térmica 1(kW)

P_{M2} – potência da máquina térmica 2 (kW)

RD – transformador de dolar para real (R\$/U\$)

Segundo procedimento:

São criadas duas séries uniformes, uma do investimento e outra do consumo, através de uma função financeira existente no Matlab chamada *PAYPER*. Esta função recebe como dado de entrada os juros no período do financiamento, os períodos do financiamento, o custo de investimento e a informação se o pagamento é postecipado ou antecipado, tanto para o sistema de cogeração como para o investimento convencional (equação 5.6).

$$P = \text{PAYPER}(\text{RATE}, \text{NPER}, \text{PV}, \text{FV}, \text{DUE}) \quad (5.6)$$

Onde,

DUE – especifica se o primeiro pagamento é postecipado ($DUE=1$) ou antecipado ($DUE=0$).

FV – valor futuro residual caso seja desejado.

NPER – período da série uniforme (intervalo de tempo em que cada receita ou dispêndio ocorre).

P – série uniforme (cria um fluxo de caixa uniforme).

PAYPER – função do Matlab que cria uma série uniforme.

PV – valor presente a ser transformado em série uniforme.

RATE – taxa ao período dado da série uniforme.

Terceiro procedimento:

O valor presente líquido do sistema convencional e do sistema de cogeração é obtido através da função já existente no Matlab chamada *PVVAR*. Esta função usa o fluxo de caixa de todas as séries uniformes, de todos os investimentos (valores presentes) e de todas as receitas (equação 5.7). A informação do período já está inserida no fluxo de caixa total, pois este é um vetor composto do custo ou receita resultante de cada período (figura 5.1).

$$PV = \text{PVVAR}(\text{CF}, \text{RATE}) \quad (5.7)$$

Onde,

CF – fluxo de caixa resultante.

PV – Valor presente líquido.

PVVAR – função do Matlab que calcula o valor presente líquido.

RATE – taxa de juros (taxa mínima de atratividade).

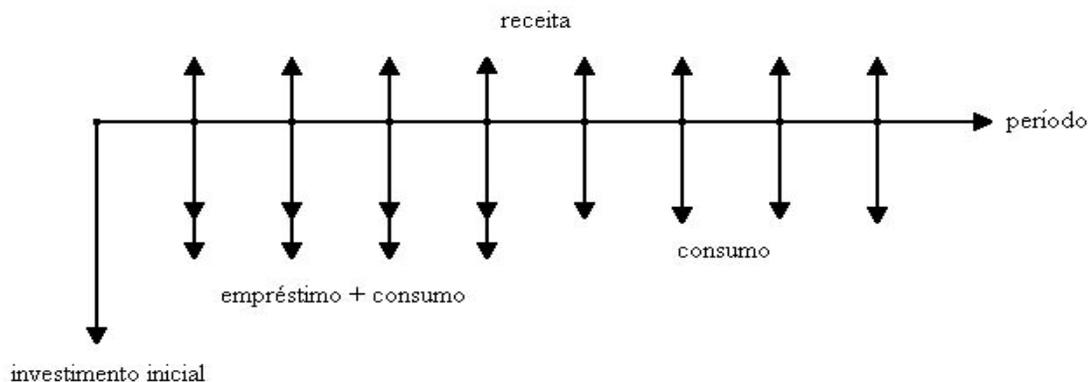


Figura 5.1 – fluxo de caixa representativo de todas as opções possíveis de acontecer.

O programa executa cada caso (cada configuração) do sistema de cogeração e compara cada resultado de um novo caso com o anterior sendo possível assim achar o VPL ótimo e compará-lo com o VPL do sistema convencional.

5.3 Procedimentos de cálculo no módulo financeiro.

Um dos principais objetivos deste módulo é obter o custo total acumulado do sistema de cogeração e o custo total acumulado do sistema convencional. Na tela principal do modelo (figura 5.2) são mostrados os dois blocos responsáveis pelo cálculo destes custos.

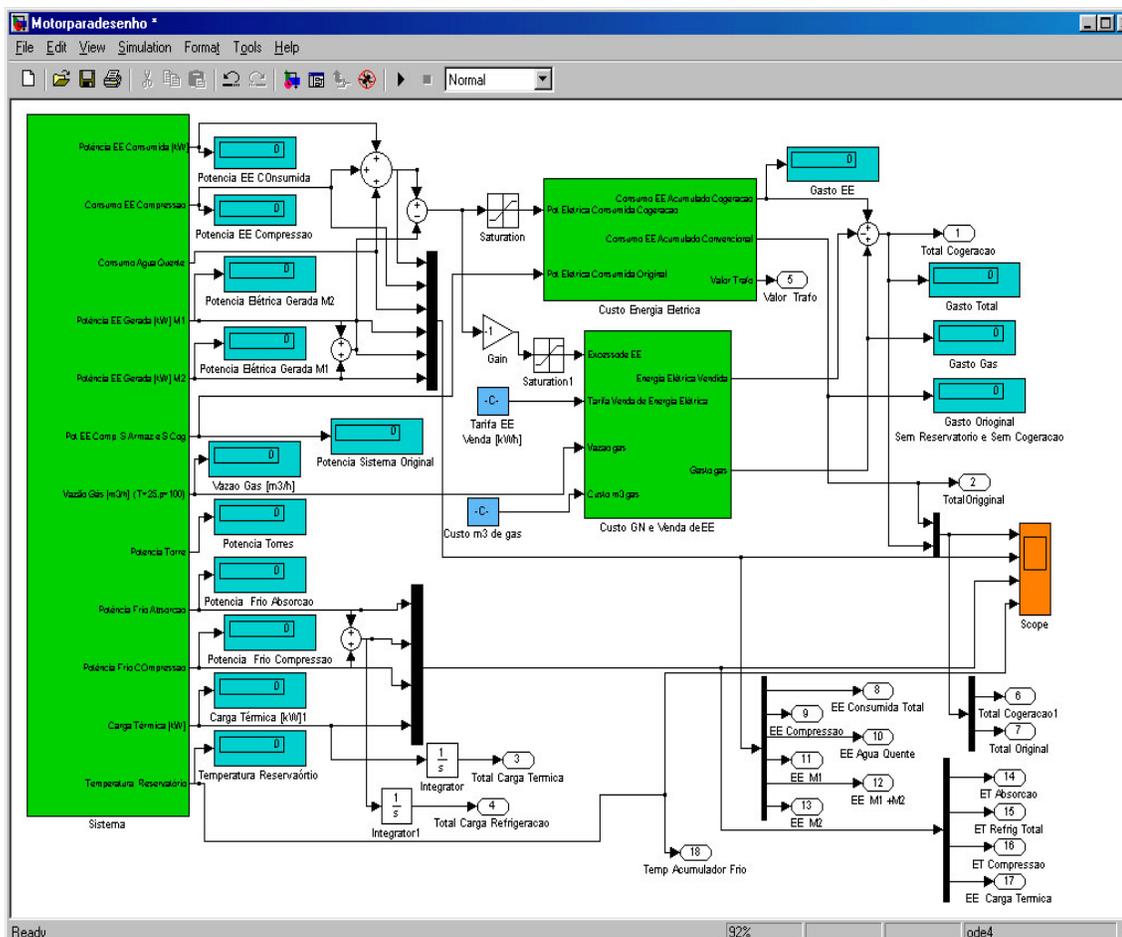


Figura 5.2 – Diagrama de blocos principal do modelo com os blocos: sistema, custo de energia elétrica e custo com gás natural e receita com venda de energia à rede.

O bloco custo de energia elétrica é responsável pelo cálculo do custo devido ao consumo de energia elétrica tanto pelo sistema de cogeração quanto pelo sistema convencional e o custo com o transformador. Recebe do bloco sistema como dado de entrada as potências consumidas com a água quente, a potência consumida com o chiller de compressão, energia elétrica consumida, potência gerada pelas máquinas térmicas e potência consumida do sistema convencional (figura 5.3). Os cálculos para se obter estes dados de saída só podem ser visualizados observando o que acontece internamente aos blocos. Para chegar até o cálculo final é necessário observar internamente mais três blocos. A figura 5.3 apresenta o bloco consumo de energia elétrica em detalhe.

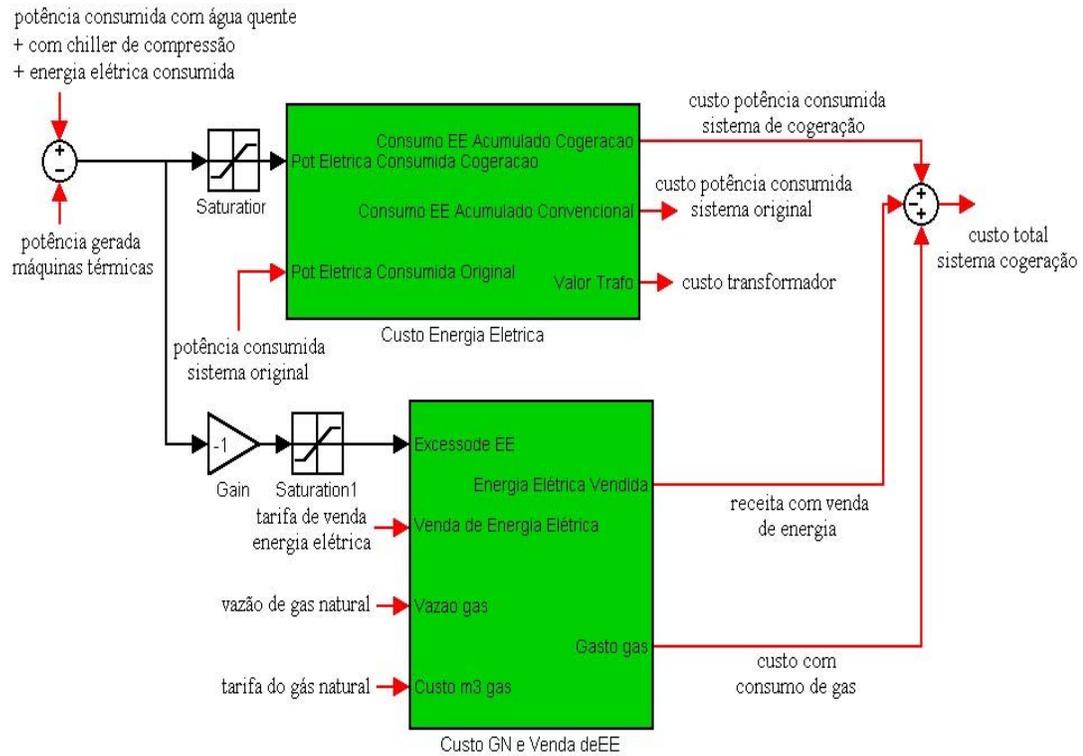


Figura 5.3 – Interior do bloco custo de energia elétrica

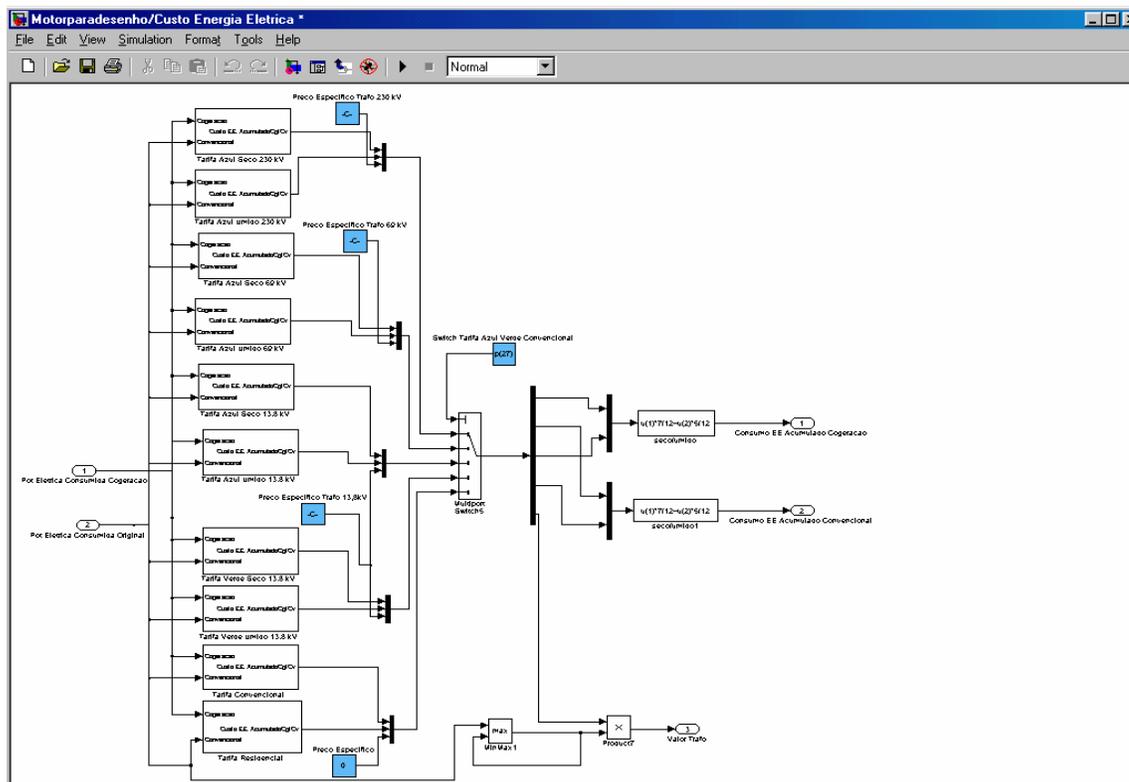


Figura 5.4 – Interior do bloco custo de energia elétrica

Procedendo-se uma primeira entrada chega-se ao bloco custo de energia elétrica onde as duas variáveis de entrada (potência elétrica consumida de cogeração e do sistema convencional) são distribuídas em dez blocos que calculam o custo atribuído a cada potência consumida. Nestes blocos estão distribuídos os tipos de tarifas (azul ou verde), os tipos de tensão (230 kV, 69 kV e 13,8 kV) e estão agrupados em conjunto, de acordo com as suas classificações (seco ou úmido), juntamente com o preço do respectivo transformador, formando assim cinco entradas de dados com três informações cada, que entram no bloco multiport switch 5 (figura 5.4). Os dois blocos na parte inferior correspondem à tarifa convencional. A chave $p_{(27)}$ comanda qual das cinco entradas será escolhida. Partindo disto, cinco informações sairão do bloco multiport, sendo a primeira e a terceira referentes ao custo da energia consumida acumulada de cogeração (seco e úmido), a segunda e a quarta referentes ao custo da energia consumida acumulada do sistema convencional (seco e úmido) e a quinta referente ao preço do transformador escolhido.

Fazendo mais uma entrada (figura 5.5) chega-se ao bloco de tarifas. Em cada um dos dez blocos mostrados anteriormente existe um mesmo procedimento de cálculo, onde além da energia consumida com o sistema de cogeração e com o sistema convencional, também são dados de entrada as tarifas correspondentes ao consumo no horário de ponta, ao consumo no horário fora do horário de ponta, à demanda no horário de ponta e à demanda fora do horário de ponta. Após o recebimentos dos dados de entrada, os blocos demanda (sistema de cogeração) e demanda 1 (sistema convencional), que possuem o mesmo procedimentos de cálculo, fornecem o custo da energia elétrica consumida acumulada para cada um dos sistemas.

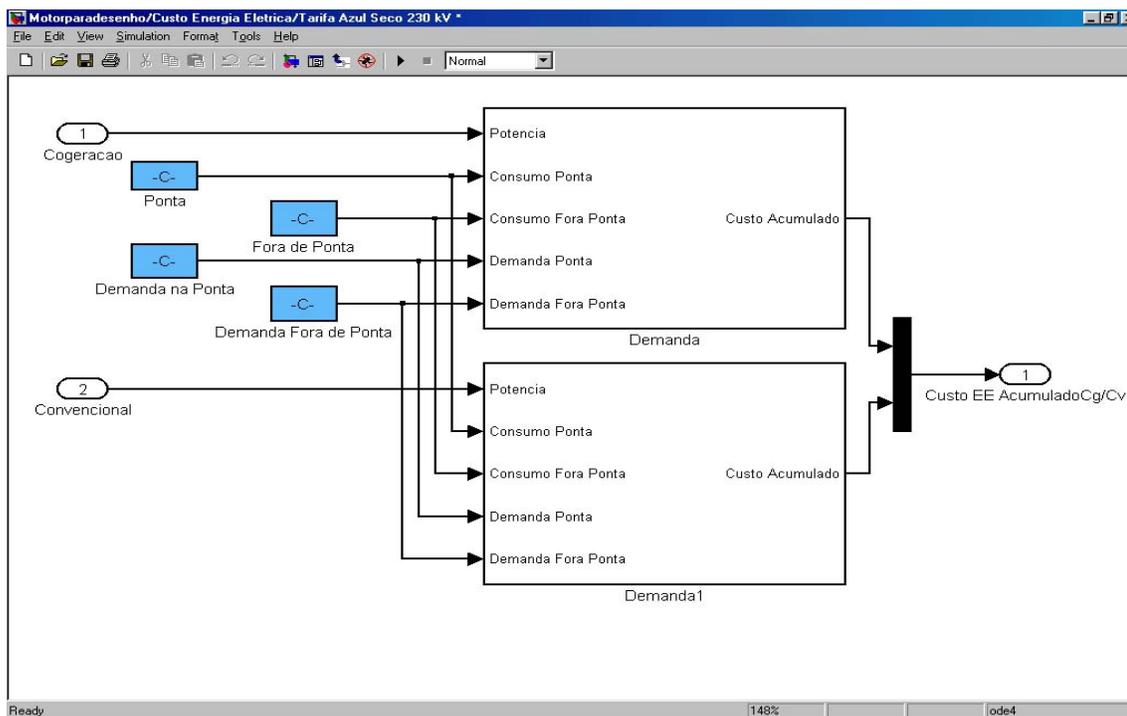


Figura 5.5 – Interior do bloco de tarifas

Fazendo a última entrada no interior de um dos blocos, demanda ou demanda 1, ocorre o último procedimento de cálculo do custo do consumo de energia elétrica acumulada. O processo é descrito por passos (figura 5.6).

Passo 1: É verificado se a potência gerada é negativa e sendo é transformada em zero. O objetivo deste passo é contar apenas com potência consumida e não deixar que seja contabilizada a potência gerada.

Passo 2: São criados os perfis do horário fora de ponta (87,5 % do período) e do horário de ponta (12,5 % do período), de forma que quando um tem valor unitário o outro tem valor nulo.

Passo 3: Cada perfil é multiplicado pela potência consumida.

Passo 4: O resultado deste passo é a demanda máxima, visto que para o cálculo do custo da demanda é necessário verificar a demanda máxima. O bloco min é usado para evitar problemas de instabilidade numérica.

Passo 5: Este passo possui duas funções. A primeira é levar as informações (a potência máxima em cada período multiplicada pelas tarifas do tipo demanda em horário de ponta e demanda em horário fora de ponta) para o passo 6. A segunda é desviar a potência máxima nos horários de ponta e fora de ponta para o passo 8. Esta última função é necessária porque em finais de semana e feriados não há horário de ponta. Portanto, a potência máxima naquele dia, independentemente do horário, será a potência máxima no horário fora de ponta.

Passo 6: Os dois perfis são somados para formar o custo de demanda de todo o período.

Passo 7: Ocorre a integração do tempo, ou seja, é calculado o tempo ocorrido.

Passo 8: É escolhido o sinal multiplicado pela potência de maior valor e em seguida é multiplicado pela tarifa de demanda no horário fora de ponta, ou seja, é criado um perfil do custo de demanda igual ao do passo 6, porém está embutida apenas a parte correspondente ao período fora de horário de ponta, isto é, corresponde ao que acontece quando é final de semana ou feriado.

Passo 9: É multiplicado o perfil do custo de demanda equivalente aos dias úteis da semana pelo tempo total ocorrido, e é dividido pela quantidade de segundos de um mês, obtendo assim o custo de demanda proporcional ao período simulado.

Passo 10: É realizado o mesmo que o passo 9, porém para o perfil do custo de demanda equivalente aos dias não úteis da semana (sábados, domingos e feriados).

Passo 11: Ocorre o produto entre a potência consumida, o perfil no horário fora de ponta e a tarifa tipo consumo de horário fora de ponta e também o produto entre a potência consumida, o perfil no horário de ponta e a tarifa tipo consumo de horário de ponta. Os dois resultados (perfil do custo do consumo no horário de ponta e o perfil do custo do consumo no horário fora de ponta) são somados, ou seja, é gerado o perfil do custo que ocorre nos dias úteis da semana.

Passo 12: É realizado o produto entre a potência consumida e a tarifa no horário fora de ponta, ou seja, é gerado o custo que ocorre nos dias não úteis da semana (sábados, domingos e feriados).

Passo 13: Os dois custos de consumo para dias úteis e dias não úteis são integrados no tempo e divididos por 3600 segundos (as tarifas de consumo são fornecidas em R\$/kWh) obtendo o custo de consumo de dias úteis e de dias não úteis em reais.

Passo 14: São somados os perfis dos custos de demanda e de consumo, sendo um para os dias úteis e o outro para os dias não úteis.

Passo 15: É realizada a média ponderada dos perfis dos custos totais dos dias úteis com os dos dias não úteis, sabendo que o total de dias não úteis no ano é igual a 111 dias, levando em consideração 52 semanas no ano multiplicado por 2 dias (sábado e domingo) mais 7 feriados.

Passo 16: é calculado o imposto de circulação de mercadorias e serviços (ICMS), com valor constante igual a 25%.

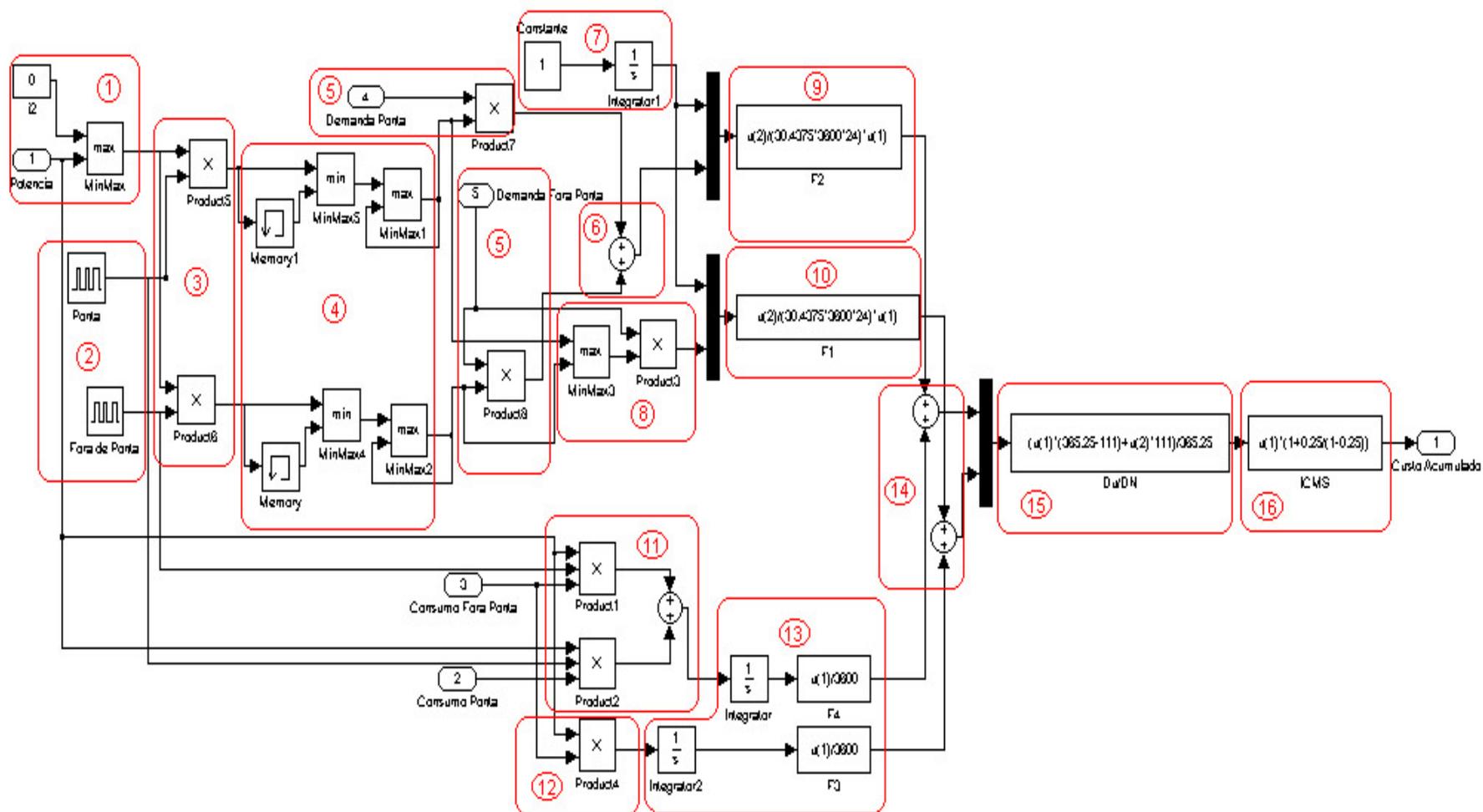


Figura 5.6 – Interior dos blocos demanda e demanda1

Duas limitações do modelo no cálculo do custo da energia elétrica consumida acumulada são a utilização de um mesmo perfil de consumo dos dias úteis e dias não úteis e a não consideração da multa no caso de ultrapassagem da demanda contratada.

O bloco custo do gás natural e venda da energia elétrica (figura 5.3) é responsável pelo cálculo da receita obtida com a venda do excesso de energia produzido e vendida pelo sistema de cogeração e pelo custo com o gás natural. Estes serão usados para determinar o balanço total que ocorre com o sistema de cogeração. Os dados de entrada recebidos são as potências consumidas com a água quente, a potência consumida com o chiller de compressão, energia elétrica consumida, potência gerada pelas máquinas térmicas, a tarifa da venda de energia elétrica, a vazão dos gases de exaustão e a tarifa do gás natural.

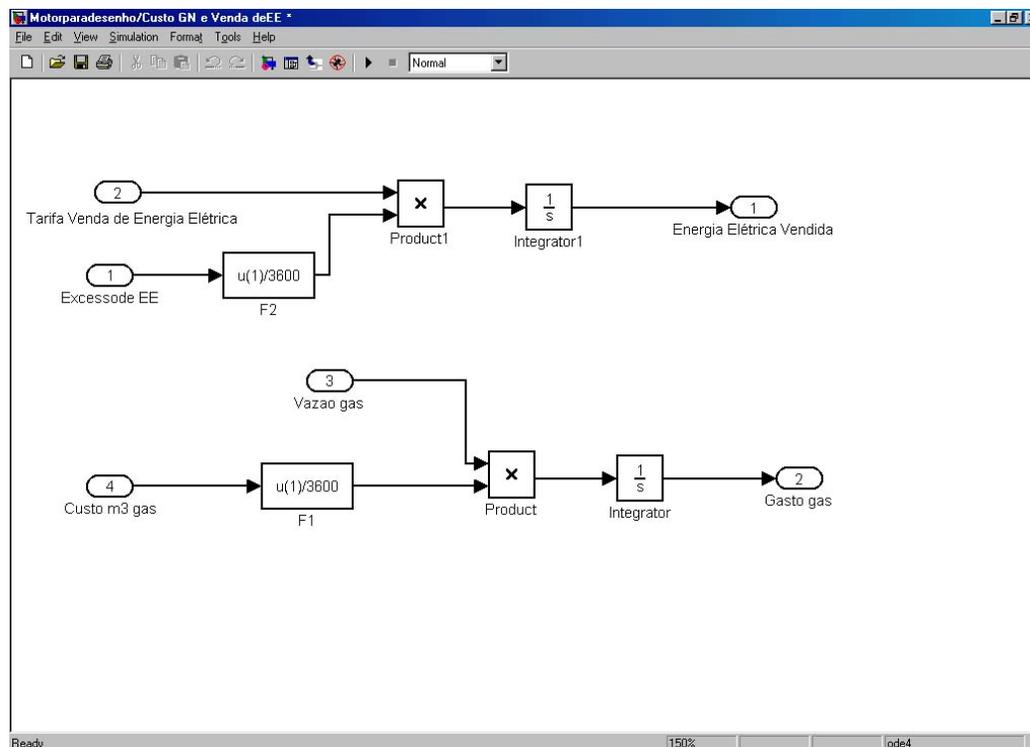


Figura 5.7 – Interior dos blocos custo do combustível e venda de energia elétrica.

Para se chegar ao cálculo final deste bloco é necessário observá-lo internamente apenas uma vez (figura 5.7). Na primeira parte, a tarifa de venda da energia elétrica é multiplicada pelo excesso de energia produzido pelo sistema de cogeração, sendo em seguida integrados no tempo gerando a receita com a venda da energia excedida. Na segunda parte, a tarifa do combustível é multiplicada por 1 hora e dividida por 3600 segundos, em seguida é multiplicada pela vazão de combustível e integrada no tempo, obtendo assim o custo com o consumo de combustível em R\$/m³.

Os custos de consumo do sistema de cogeração e do sistema convencional são utilizados no cálculo do VPL de cada um destes sistemas. Todos os custos com investimentos também são computados, porém estes não variam com a conduta do sistema. A conduta do sistema de cogeração determinará um maior ou menor consumo e assim um maior ou menor VPL. Existem milhões de formas diferentes de operar do sistema de cogeração, apresentando resultados financeiros também distintos. Para este problema será apresentado como analisar as diversas formas de operação do sistema de cogeração.

6. CASO BASE

Nesta seção será apresentado o caso que servirá de referência para todos os casos estudados e apresentados no próximo capítulo. Serão mostrados todos os dados de entrada do modelo e os resultados encontrados nas análises realizadas.

A quantidade de dados de entrada utilizada no programa é relativamente extensa, havendo ao menos quatro grupos a serem determinados: demandas a serem supridas (módulo de demandas), características técnicas dos equipamentos (módulo do sistema), itens financeiros (módulo financeiro) e modos de operação do sistema de cogeração (módulo de configuração de tarefas).

6.1 Dados de entrada do módulo do sistema.

Nesta seção constam todos os dados de entrada, de característica técnica, do sistema de cogeração e do sistema convencional. Grande parte destes dados foi obtida de tabelas e manuais dos equipamentos adquiridos no projeto COGENCASA (capítulo 2), porém alguns dados necessários eram imprecisos ou não existiam, sendo utilizados dados aproximados e apontando a necessidade de operar a planta do COGENCASA para realizar o levantamento dos dados faltosos. A realização desta tarefa é importante, porém não existe tempo hábil para cumpri-la, pois esta planta ainda não se encontra totalmente instalada.

Os equipamentos usados na modelagem do sistema são: uma microturbina (30 kW), um grupo gerador (30 kW), um chiller de absorção (35 kW), um chiller de compressão (14 kW). Para o sistema convencional, o chiller de compressão usado terá potência igual à máxima demanda térmica de frio durante todo o dia. Por exemplo, se a carga térmica máxima for 60 kW, o chiller de compressão do sistema de cogeração possuirá 14 kW (a diferença sendo provida pelo termoacumulador e pelo chiller de absorção), enquanto o chiller de compressão do sistema convencional terá potência de 60 kW.

A tabela 6.1 apresenta todos os dados utilizados no sistema, divididos em sete grupos: máquina térmica 1, máquina térmica 2, caldeira de recuperação da máquina térmica 1, caldeira de recuperação da máquina térmica 2, termoacumulador de água fria, termoacumulador de água quente e chiller de absorção.

Tabela 6.1 – Dados de entrada do sistema de cogeração.

Máquina térmica 1 (turbina)		
Eficiência elétrica	0,3	
Eficiência térmica	0,55	
Temperatura de saída dos gases de exaustão	260	° C
Temperatura de referencia	25	° C
PCI do combustível	36.057	kJ/kg
Massa molar do combustível	31	kg/kmol
Máquina térmica 2 (grupo gerador)		
Eficiência elétrica	0,4	
Eficiência térmica	0,25	
Temperatura de saída dos gases de exaustão	400	° C
Temperatura de referencia	25	° C
PCI do combustível	36.057	kJ/kg
Massa molar do combustível	31	kg/kmol
Caldeira de recuperação da máquina térmica 1		
Eficiência da caldeira	0,6	
Calor específico do gás de exaustão	1,35	kJ/kg.K
Temperatura de saturação da água	180	° C
Temperatura de entrada da água	90	° C

Tabela 6.1 – continuação

Temperatura de saída da água	95	° C
Calor específico da água associado à temperatura de saturação	4,53	kJ/kg.K
Calor específico de vapor associado à temperatura de saturação	1,87	kJ/kg.K
Entalpia de líquido-vapor associado à temperatura de saturação	2.015	kJ/kg
Caldeira de recuperação da máquina térmica 2		
Eficiência da caldeira	0,7	
Calor específico dos gases de exaustão	1,0035	kJ/kg.K
Temperatura de saturação da água	180	° C
Temperatura de entrada da água	90	° C
Temperatura de saída da água	95	° C
Calor específico da água associado à temperatura de saturação	4,53	kJ/kg.K
Calor específico de vapor associado à temperatura de saturação	1,87	kJ/kg.K
Entalpia de líquido-vapor associado à temperatura de saturação	2.015	kJ/kg
Termoacumulador de água fria		
Calor específico da água	4,19	kJ/kg.K
Temperatura de fusão da água	0	° C
Temperatura inicial do reservatório	9	° C
Calor específico do gelo	2,04	kJ/kg.K
Entalpia de sólido-líquido do gelo	337	kJ/kg
Massa total de água fria do armazenador	20.000	kg
Termoacumulador de água quente		
Calor específico dos gases de exaustão	1,0035	kJ/kg.K
Coefficiente global de transferência de calor dos gases de exaustão multiplicado pela área de troca	3	kW/K
Temperatura ambiente	25	° C
Coefficiente global de transferência de calor da água multiplicado pela área de troca	0,5	kW/K
Massa do reservatório	2.000	kg
Temperatura inicial	25	° C
Temperatura de ativação do relé (libera a troca de calor com os gases de exaustão)	45	° C
Temperatura de desativação do relé (impede troca de calor com os gases de exaustão)	47	° C
Chillers		
COP do chiller de absorção	0,7	
COP do chiller de compressão	1,5	

Os dados inseridos no programa são constantes. O ideal seria a utilização de curvas com as características técnicas de cada equipamento, mas estas curvas ainda não foram levantadas experimentalmente. Após a obtenção das curvas técnicas dos equipamentos através do projeto COGENCASA será possível realizar as implementações. As modificações necessárias no programa são triviais, porém importantes.

6.2 Dados de entrada do módulo de demandas.

As cargas térmicas e elétricas são dadas em forma de curvas variáveis ao longo do dia. Por praticidade, escolheu-se montar os perfis a partir do somatório de cargas constantes definidas em períodos fixos (no entanto, esse procedimento pode ser facilmente generalizado para perfis quaisquer). Para cada valor de carga térmica ou elétrica é determinado um horário para o início e fim de sua atuação. De posse de todas as cargas térmicas ou elétricas no

decorrer do período, de acordo com a posição das chaves do módulo de configuração de tarefas, os equipamentos entram em ação para supri-las. Na tabela 6.2 são apresentados os valores usados no caso base.

Tabela 6.2 – Dados de entrada do módulo de demandas.

Carga térmica		
Carga térmica 1 (09:00 – 12:00 h)	50	kW
Carga térmica 2 (14:00 – 19:00 h)	60	kW
Carga térmica 3 (12:00 – 14:00 h)	6	kW
Somatório máximo das cargas térmicas	60	kW
Carga térmica máxima	50	kW
Carga elétrica		
Carga elétrica 1 (08:00 – 18:48 h)	50	kW
Demanda elétrica 2 (14:00 – 20:00 h)	10	kW
Demanda elétrica 3 (17:00 – 19:00 h)	50	kW
Demanda elétrica 4 (00:00 – 24:00 h)	0	kW
Demanda elétrica 5 (01:00 – 03:00 h)	0	kW
Somatório máximo das demandas elétricas (desconsiderando a usada em refrigeração)	110	kW
Demanda elétrica máxima	60	kW
Resistência elétrica		
Consumo de água 1 (10:00 – 12:00 h)	300	litros/hora
Consumo de água 2 (17:30 – 22:00 h)	600	litros/hora
Consumo de água 3 (22:00 – 24:00 h)	400	litros/hora
Somatório máximo de consumo de água	600	litros/hora
Consumo de água máximo	100	litros/hora
Temperatura de entrada da água	25	° C
Temperatura desejada	50	° C

Os dados de entrada deste módulo, separados nas três subdivisões, podem ser visualizados graficamente (figuras 6.1, 6.2 e 6.3). Na figura 6.1 podem ser visualizados dois gráficos. O gráfico superior corresponde à soma de todas as demandas térmicas que ocorrem no caso base, enquanto que o gráfico inferior corresponde a cada uma das cargas térmicas inseridas no sistema. O eixo horizontal corresponde ao tempo em segundos e o eixo vertical corresponde à potência demandada.

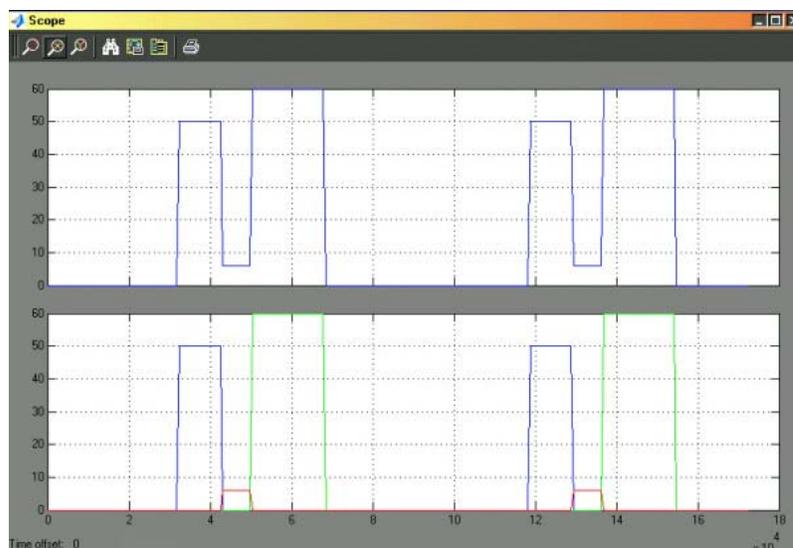


Figura 6.1: Demanda térmica total e demandas térmicas do caso base (demanda de frio).

Na figura 6.2 também são visualizados dois gráficos. O gráfico superior corresponde à soma de todas as demandas elétricas que ocorrem no caso base, enquanto que o gráfico inferior corresponde a cada uma das cargas elétricas inseridas no sistema (menos o consumo com refrigeração e produção de água quente). O eixo horizontal corresponde ao tempo em segundos e o eixo vertical corresponde à potência demandada.

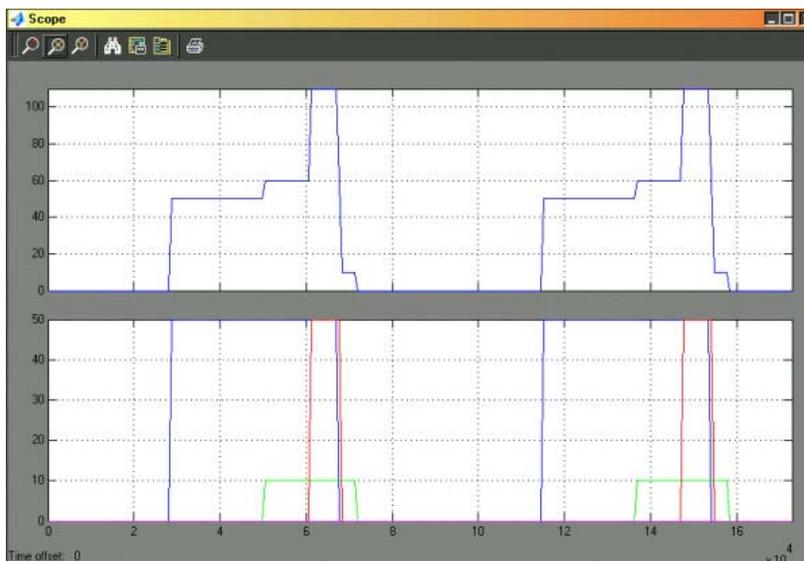


Figura 6.2: Demanda elétrica total e demandas elétricas do caso base

Na figura 6.3, o gráfico superior corresponde à soma de todas as demandas de água quente em litros por hora que ocorrem no caso base, enquanto que o gráfico inferior corresponde a cada uma das demandas de água quente inseridas no sistema. Desta forma o eixo horizontal corresponde ao tempo em segundos e o eixo vertical corresponde consumo de água em litros por hora.

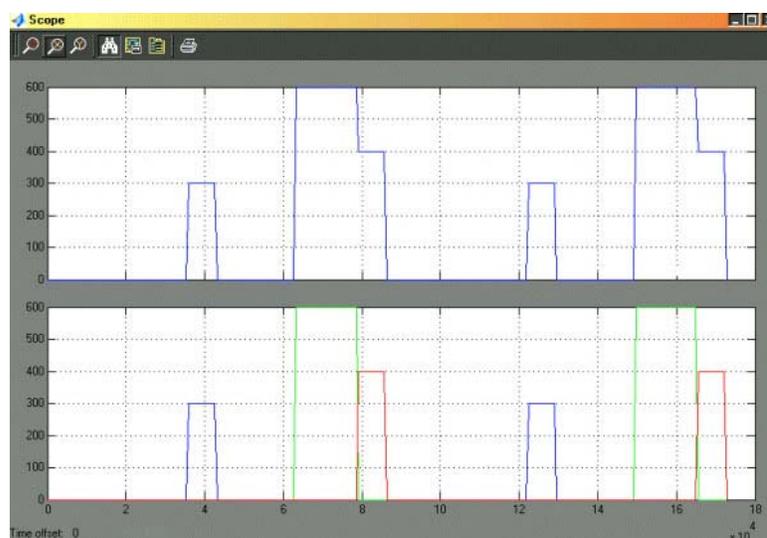


Figura 6.3: Resistência elétrica total e resistências elétricas do caso base (demanda de quente).

Dividindo, em cada uma das três figuras (6.1, 6.2 e 6.3), as curvas de demanda por seus respectivos valores máximos (somatório máximo), obtém-se perfis normalizados (entre 0 e 1).

Multiplica-se, então, o perfil unitário pela demanda máxima para criar os perfis que serão usados no modelo.

6.3 Dados de entrada do módulo de configuração de tarefas

O módulo de configuração de tarefas é responsável pelo controle dos equipamentos utilizados na cogeração. De acordo com as posições das chaves será determinado se o equipamento deverá ser ligado ou desligado e também, quando ligado, como deve se comportar de acordo com as necessidades impostas.

No caso base (tabela 6.3), a microturbina foi configurada para ligar sempre que a temperatura do reservatório for maior que o mínimo (9 graus Celsius) e, quando ligada, gerar o máximo possível. O motor foi configurado para ser ligado no horário de ponta e, quando ligado, tentar modular a geração à carga elétrica. O chiller de absorção está configurado para ligar sempre que houver carga térmica ou a temperatura do armazenador de frio for superior ao mínimo e, quando ligado, gerar o máximo possível de frio. O chiller de compressão está configurado para desligar no horário de ponta, ligar quando houver carga térmica ou a temperatura do armazenador de frio for maior que a mínima e, quando ligado, tentar gerar o máximo possível de frio. . A tabela 4.1 apresenta o significado de cada posição de chave, oferecendo o sentido físico de cada posição de chave do caso base apresentada na tabela 6.3.

Tabela 6.3: Posicionamento das chaves no caso base

Chave 1: 0	Chave 7: 1	Chave 13: 0	Chave 19: 1	Chave 25: 0
Chave 2: 0	Chave 8: 0	Chave 14: 1	Chave 20: 1	Chave 26: 0
Chave 3: 1	Chave 9: 0	Chave 15: 1	Chave 21: 1	Chave 27: 3
Chave 4: 1	Chave 10: 1	Chave 16: 1	Chave 22: 1	
Chave 5: 0	Chave 11: 1	Chave 17: 0	Chave 23: 0	
Chave 6: 1	Chave 12: 0	Chave 18: 1	Chave 24: 1	

A figura 6.4 apresenta o comportamento elétrico do sistema de cogeração no caso base descrito acima, em um período de 2 dias. A figura 6.5 apresenta o comportamento térmico do sistema e a figura 6.6 apresenta a evolução da temperatura do armazenador de frio durante os dois dias simulados.

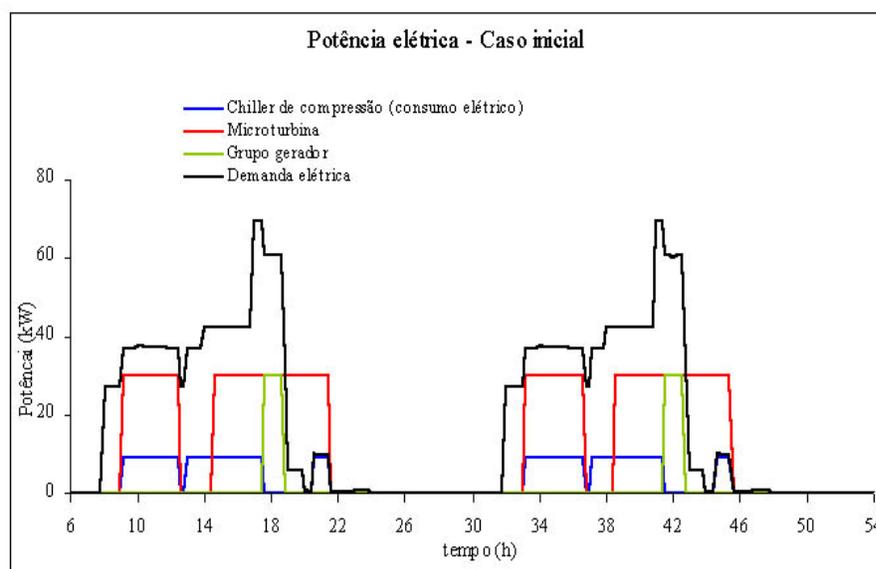


Figura 6.4: Curvas de energia elétrica no caso base

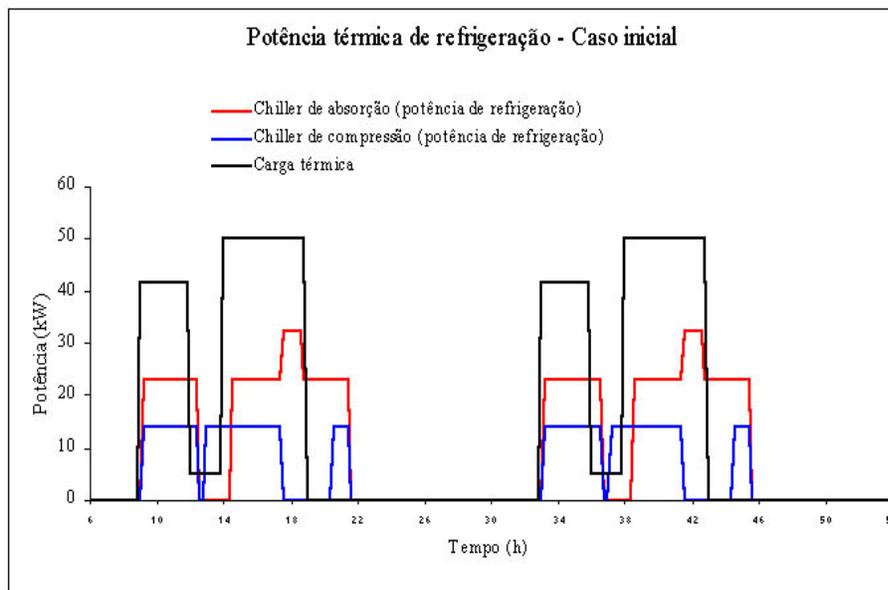


Figura 6.5: Curvas de energia térmica no caso base

Examinando as figuras 6.4, 6.5 e 6.6 em conjunto, observa-se que a microturbina, sempre que ligada, está gerando o máximo, e está ligada apenas quando a temperatura do armazenador está acima do mínimo. Por outro lado, o motor liga apenas quando ocorre horário de ponta. Embora o motor esteja configurado para ligar sempre que ocorrer demanda elétrica, este, por ser um equipamento secundário (chave 25 na posição 0), “percebe” apenas a diferença entre a demanda elétrica e a potência gerada pela turbina. O chiller de absorção, da mesma forma que a microturbina, permanece ligado enquanto a temperatura do armazenador de frio estiver alta. Acontece coisa parecida com o split, mas, no entanto, este foi configurado para desligar no horário de ponta (chave 19 na posição 1).

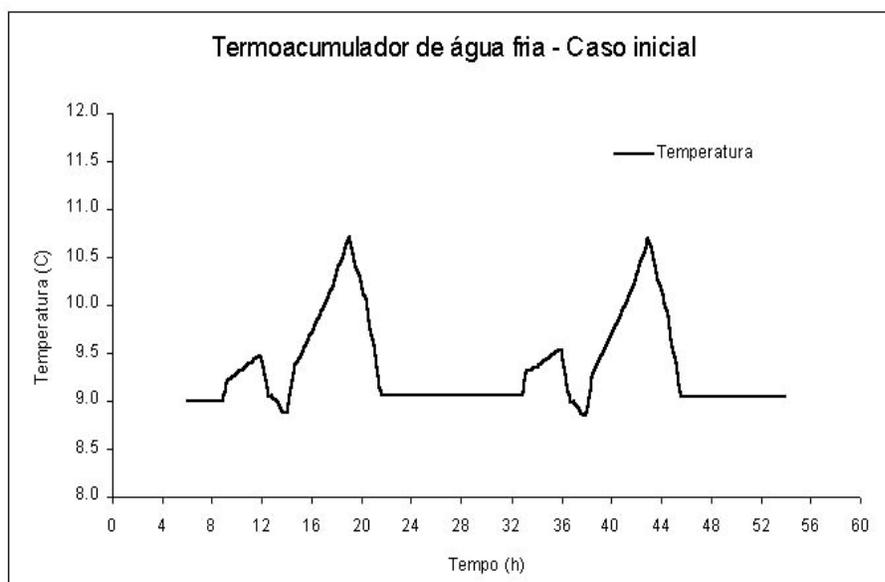


Figura 6.6: Evolução da temperatura no termoacumulador de água fria no caso base

Por fim, ainda existem mais quatro dados de entrada (tabela 6.4) que correspondem ao tempo em que cada equipamento (máquinas térmicas 1 e 2, chiller de absorção e chiller de compressão) deve permanecer desligado, ou seja, uma vez desligado, os equipamentos não

poderão mais ligar enquanto durar o tempo determinado no temporizador. Este artifício é utilizado para evitar que o equipamento fique ligando e desligando, chegando a ser danificado.

A temperatura desejada para que o chiller de absorção seja ligado é mostrado na tabela 6.4 (temperatura do termoacumulador para iniciar o chiller de absorção). Para que tal operação aconteça é necessário o uso de dois relés que determinam a partir de que acréscimo de temperatura (na temperatura do termoacumulador) o chiller de absorção deverá ser ligado ou desligado.

Tabela 6.4 – Temporizadores do sistema de controle no caso base.

Temperatura do termoacumulador para iniciar o chiller de absorção	9	° C
Temperatura de acionamento do relé que liga o chiller de absorção	0,2	° C
Temperatura de acionamento do relé que desliga o chiller de absorção	0,1	° C
Temporizador da máquina térmica 1	360	s
Temporizador da máquina térmica 2	360	s
Temporizador do chiller de compressão	360	s
Temporizador do chiller de absorção	360	s

Através dos dados de entrada apresentados nesta seção, o sistema de cogeração é influenciado a ter um maior ou menor VPL, o que determina qual a melhor opção de investimento, sistema de cogeração ou convencional. Na seção seguinte, através dos dados financeiros de entrada, os VPLs são determinados.

6.4 Dados de entrada do módulo financeiro

No caso base, o programa simula um período de execução de dois dias, o que pode ser observado nas figuras 6.4, 6.5 e 6.6. Neste caso, o primeiro dia é utilizado para que o sistema entre em regime cíclico e o segundo dia, como um dia característico, é usado para determinar os custos em um mês de operação. O número de dias usados para que o sistema entre em regime cíclico e o número de dias usados para compor o custo mensal podem ser especificado no modelo.

O fluxo de caixa dos dois sistemas recebe dois tipos de dispêndios. O investimento inicial e o custo de consumo ao longo do período de operação (120 meses). Para o caso base não existe empréstimo e nem venda do excedente de energia produzida no sistema de cogeração.

No fluxo de caixa do sistema convencional é considerado como investimento inicial os custos de instalação e o custo do chiller de compressão. É considerado como custo de consumo a compra de energia elétrica da rede de distribuição para atender as demandas elétricas, a potência elétrica consumida pelo chiller de compressão e a potência elétrica utilizada por resistências elétricas para atender a demanda de água quente.

No fluxo de caixa do sistema de cogeração é considerado como investimento inicial os custos de instalação e os custos com os equipamentos de acordo com a potência nominal máxima de cada um. É considerado como custo de consumo a compra de energia elétrica da rede de distribuição para atender a demanda de energia elétrica que o sistema de cogeração não conseguir suprir, a compra do combustível consumida nas duas máquinas térmicas, e a potência elétrica consumida pelo chiller de compressão.

As tarifas utilizadas para o caso base (tabela 6.5) foram obtidas no endereço eletrônico da CELPE (Companhia de energia elétrica de Pernambuco), atualizados em julho do ano de 2003. Esta tabela se refere a todas as tarifas carregadas no programa, mas não especifica qual a tarifa usada no caso base, pois estas serão escolhidas pela chave 27 do módulo de configuração de tarefas. A chave 27 pode escolher entre cinco grupos de tarifas: azul 230kV, azul 69 kV, azul 13,8 kV, verde 13,8 kV e residencial-convencional. No caso base, a chave 27

está na posição 3. Isto significa que as quatro tarifas de energia elétrica usadas são do tipo azul com transformador de 13,8 kV.

Tabela 6.5 – Tarifas (energia elétrica e combustível)

Tarifa azul seca 230 kV consumo fora de ponta	0,05664	R\$/ kW
Tarifa azul seca 230 kV consumo em ponta	0,08005	R\$/ kW
Tarifa azul seca 230 kV demanda em ponta	14,04	R\$/ kW
Tarifa azul seca 230 kV demanda fora de ponta	2,92	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 230 kV consumo fora de ponta	0,04813	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 230 kV consumo em ponta	0,07002	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 230 kV demanda em ponta	52,14	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 230 kV demanda fora de ponta	10,91	R\$/ kW
Tarifa azul seca 69 kV consumo fora de ponta	0,0662	R\$/ kW
Tarifa azul seca 69 kV consumo em ponta	0,0961	R\$/ kW
Tarifa azul seca 69 kV demanda em ponta	20,3	R\$/ kW
Tarifa azul seca 69 kV demanda fora de ponta	5,55	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 69 kV consumo fora de ponta	0,5715	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 69 kV consumo em ponta	0,08521	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 69 kV demanda em ponta	77,22	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 69 kV demanda fora de ponta	20,53	R\$/ kW
Tarifa azul seca 13,8 kV consumo fora de ponta	0,0766	R\$/ kW
Tarifa azul seca 13,8 kV consumo em ponta	0,16114	R\$/ kW
Tarifa azul seca 13,8 kV demanda em ponta	24,57	R\$/ kW
Tarifa azul seca 13,8 kV demanda fora de ponta	8,19	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 13,8 kV consumo fora de ponta	0,06771	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 13,8 kV consumo em ponta	0,14912	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 13,8 kV demanda em ponta	73,72	R\$/ kW
Tarifa azul úmida 13,8 kV demanda fora de ponta	24,57	R\$/ kW
Tarifa verde seca 13,8 kV consumo fora de ponta	0,0766	R\$/ kW
Tarifa verde seca 13,8 kV consumo em ponta	0,72923	R\$/ kW
Tarifa verde seca 13,8 kV demanda	8,19	R\$/ kW
Tarifa verde úmida 13,8 kV consumo fora de ponta	0,06771	R\$/ kW
Tarifa verde úmida 13,8 kV consumo em ponta	0,71725	R\$/ kW
Tarifa verde úmida 13,8 kV demanda	24,57	R\$/ kW
Tarifa conv. Resid, ind, com, e outros (alta tensão) consumo	0,12981	R\$/ kW
Tarifa conv. Resid, ind, com, e outros (alta tensão) demanda	8,86	R\$/ kW
Tarifa do gás natural (com imposto e encargo financeiro)	0,61	R\$/m ³
Tarifa para venda de energia	0	R\$/kW

A tabela 6.6 apresenta os custos com investimentos. É necessário observar que para se obter o preço exato dos equipamentos (máquinas térmicas 1 e 2, chillers de absorção e de compressão) é necessário multiplicar o valor tabelado pela potência nominal máxima de cada um deles (seção 6.1). O custo real de instalação do termoacumulador é somente obtido multiplicando o custo de instalação por unidade de massa de água pela sua massa total (seção 6.1). Os custos com os três tipos de transformadores são carregados, porém, como a chave 27 está na posição 3, o preço usado é o do transformador de 13,8 kV.

Tabela 6.6 – Planilha de custos de investimento do caso base.

Custo da máquina térmica 1	1.302,80	US\$/kW
Custo da máquina térmica 2	375,00	US\$/kW
Custo do chiller de absorção	750,00	US\$/kW
Custo do chiller de compressão	250,00	US\$/kW
Preço do transformador 230 kV	100,00	R\$
Preço do transformador 69 kV	80,00	R\$
Preço do transformador 13,8 kV	40,00	R\$
Custo de instalação do termo acumulador por massa d' água	0,5	R\$/kg
Custo de instalação do sistema convencional	5.000,00	R\$

Para se obter o VPL as variáveis financeiras mostradas na tabela 6.7 também devem ser consideradas. Os dois últimos itens (entrada do sistema de cogeração e entrada do sistema convencional) estão informando que todo o valor do investimento será pago a vista, ou seja, nenhum empréstimo será realizado.

Tabela 6.7 – Variáveis financeiras no caso base.

Preço do dolar	3,40	
Taxa de mercado	0,02	% a.m.
Período de vida de operação da planta	10*12	meses
Taxa do financiamento	0,03	% a.m.
Período para pagamento do financiamento	2*12	meses
Quantidade de dias no período	365,25/12	dias
Alíquota de ICMS da energia elétrica	0,025	%
Entrada do sistema de cogeração	1	%
Entrada do sistema convencional	1	%

Com todos estes dados financeiros é possível montar o fluxo de caixa do sistema de cogeração e do convencional para o caso base (figuras 6.7 e 6.8). Pode-se observar que não existe receita nos dois fluxos de caixa. A única receita que pode existir é com a venda do excesso de energia elétrica, o que é impossível de acontecer no sistema convencional e para o sistema de cogeração foi escolhido para não ocorrer (tarifa de venda igual a 0). A venda dos equipamentos após o período de operação não existe, na modelagem do programa este dado não foi levado em consideração.



Figura 6.7 – fluxo de caixa do sistema convencional no caso base.

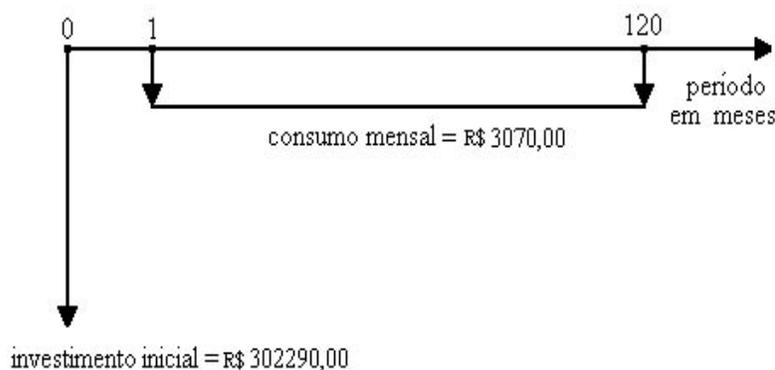


Figura 6.8– fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso base.

No fluxo de caixa do sistema convencional (figura 6.7) o investimento inicial foi de R\$ 47.500,00, sendo o gasto com instalação igual a R\$ 5.000,00 e o gasto com o chiller de compressão igual a R\$ 42.500,00. O custo de consumo é igual a R\$ 8.233,10. No cálculo do custo de consumo do sistema convencional são contabilizadas três parcelas. A primeira é a potência consumida para atendimento da demanda elétrica, a segunda é a potência elétrica consumida devido ao uso do chiller de compressão para atender à demanda térmica de frio e a terceira é devido à resistência elétrica utilizada para aquecer a água e atender a demanda de água quente.

No fluxo de caixa do sistema de cogeração (figura 6.8) o investimento inicial foi de R\$ 30.2290,00, sendo o gasto com instalação igual a R\$ 30.000,00 e o gasto com os equipamentos igual a R\$ 272.290,00. O custo de consumo é igual a R\$ 3.070,00 (devido a o a compra de energia elétrica da rede de distribuição, a compra do combustível e a potência elétrica consumida pelo chiller de compressão).

Os dois fluxos de caixa (sistema convencional e cogeração) são bem distintos, enquanto o sistema convencional apresenta um baixo investimento convencional e um alto consumo mensal, com o sistema de cogeração ocorre o contrário, alto investimento inicial e um baixo consumo mensal. Isto torna mais difícil escolher o empreendimento em cogeração devido ao alto desembolso inicial gerando um risco alto para o empresário. Contudo o sistema que representa a melhor escolha só pode ser apontado pelo VPL.

O VPL do sistema convencional (R\$ 420.920,00) é inferior ao VPL do sistema de cogeração (R\$ 441.720,00) representando assim a melhor alternativa a ser empreendida. A forma de operação do sistema de cogeração comandada pelo módulo de configuração de tarefas é determinante na obtenção de um maior ou menor VPL para o sistema de cogeração. Dentro dos vários estudos de casos que serão mostrados no próximo capítulo será possível verificar se, com a mudança das chaves, o sistema de cogeração passa a ser mais vantajoso.

7. ESTUDO DE CASOS – SIMULAÇÃO

É importante conhecer o comportamento do modelo para as várias situações que podem ser criadas. A partir deste conhecimento implementações no modelo podem ser realizadas para a diminuição do tempo de execução na otimização por busca exaustiva das chaves.

Esta seção mostra uma primeira bateria de estudos realizados no modelo. Sobre o caso base, apresentado no capítulo anterior (tabela 6.3), foram realizadas diversas simulações com variações na demanda de energia elétrica, na demanda de energia térmica, nas tarifas de energia elétrica e nas chaves do módulo de configuração de tarefas.

Cada um dos quatro casos estudados (tabela 7.1) será apresentado em uma seção diferente. Os perfis de demandas elétrica e térmica e as tarifas de energia elétrica serão dobrados, sucessivamente. Para os quatro casos as chaves serão variadas uma a uma. Cada posição de chave apresentará um resultado (VPL).

Tabela 7.1: Casos estudados

Caso 1	O caso base é executado modificando todas as chaves uma a uma
Caso 2	O caso base é executado com a demanda térmica dobrada e modificando todas as chaves uma a uma.
Caso 3	O caso base é executado com a demanda elétrica dobrada e modificando todas as chaves uma a uma
Caso 4	O caso base é executado com a tarifa elétrica dobrada e modificando todas as chaves uma a uma

Nestes estudos serão geradas várias formas de resposta do modelo, juntos formam um total de 108 VPLs. A intenção é aprender mais sobre o comportamento do modelo quando simulado. É possível que algumas chaves tendam a representar o caso ótimo para todos os estudos, e é também possível que a diferença entre os VPLs de um determinado caso seja semelhante à diferença entre os VPLs dos outros casos restantes. Caso essas possibilidades sejam confirmadas, abre-se a perspectiva de uma hierarquização das chaves, permitindo focalizar a otimização nas chaves mais importantes.

7.1 Estudo com variação das chaves.

Neste primeiro caso estudado, ocorre apenas a variação das chaves uma por uma. Os resultados são apresentados na tabela 7.2. A linha “posição 0” significa que as chaves estão na posição do caso base (tabela 6.3). Cada nova linha indica a chave que foi invertida, sempre mantendo todas as outras chaves em conformidade com o caso base.

Ainda na tabela 7.1, “VPLconvencional” significa o valor presente líquido total do sistema convencional onde toda a energia elétrica é comprada da rede pública (não há microturbina ou grupo gerador), todo o condicionamento de ar é gerado por sistemas de refrigeração com ciclos de compressão e não há armazenadores de frio. “VPL Total” indica o valor presente líquido total (investimento inicial mais consumo de energia elétrica e combustível traduzidos em valor presente) do sistema de microcogeração proposto. “VPL consumo” indica o valor presente líquido apenas do consumo com energia elétrica e combustível. A diferença entre “VPL Total” e “VPL Consumo” é o valor presente líquido do investimento em equipamentos e a instalação.

Tabela 7.2: VPLs do caso estudado (caso1)

	Caso1 (VPL convencional = 420.920,00)		
	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
Posição 0	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 1	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 2	461.070,00	158.780,00	46%
Chave 3	-1	-1	-1
Chave 4	514.430,00	212.140,00	95%
Chave 5	433.790,00	131.500,00	21%
Chave 6	444.250,00	141.960,00	31%
Chave 7	503.880,00	201.590,00	86%
Chave 8	410.960,00	108.670,00	0%
Chave 9	440.490,00	138.200,00	27%
Chave 10	410.990,00	108.700,00	0%
Chave 11	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 12	442.940,00	140.650,00	29%
Chave 13	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 14	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 15	468.840,00	166.550,00	53%
Chave 16	441.720,00	139.430,00	28%
Chave 17	445.530,00	143.240,00	32%
Chave 18	472.510,00	170.220,00	57%
Chave 19	454.530,00	152.240,00	40%
Chave 20	439.020,00	136.730,00	26%
Chave 21	447.020,00	144.730,00	33%
Chave 22	509.400,00	207.110,00	91%
Chave 23	440.680,00	138.390,00	27%
Chave 24	446.110,00	143.820,00	32%
Chave 25	442.110,00	139.820,00	29%
Chave 26	442.040,00	139.750,00	29%

Os casos indicados pelo valor -1 indicam as inversões de chaves em que a energia de refrigeração total gerada durante o dia (chiller de absorção mais o chiller de compressão) foi inferior à integração da carga térmica; i.e., o sistema não conseguiu vencer a carga térmica imposta.

Na terceira coluna (porcentagem do VPL de consumo ótimo) é mostrado o acréscimo no gasto com energia elétrica e combustível que ocorre entre a chave invertida ótima daquele caso estudado (célula em destaque, na mesma coluna) e a célula em questão. Chave invertida ótima é a inversão de chave que proporciona o menor VPL.

Observando a tabela 7.2 nota-se que quando a chave 3 foi invertida, a microturbina deixou de ser ligada sempre que a temperatura do reservatório esteve acima de 9 graus Celsius, não sendo ligada em nenhuma opção. Com isso, apenas o grupo gerador ligou, disponibilizando uma quantidade menor de energia para o chiller de absorção e diminuindo a energia total de frio gerada durante o dia.

Para este primeiro estudo, o caso ótimo ocorre quando todas as chaves estão posicionadas no caso base e a chave 8 encontra-se invertida. No caso base, então, o gasto com consumo (em valor presente) é 28% maior que no caso ótimo.

As mudanças nas chaves 8 (o grupo gerador é ligado sempre que percebe demanda elétrica) e 10 (o grupo gerador é ligado o tempo todo, mas sempre limitado pela demanda

elétrica porque a chave 12 está na posição 0) tem o mesmo efeito: fazer com que, durante o dia, quando a demanda elétrica é maior que a geração da turbina, o grupo gerador também gere energia elétrica.

O grupo gerador, no caso base, foi configurado para ligar quando houver horário de ponta. Quando a chave 8 foi invertida e o grupo gerador também passou a ligar quando ocorresse demanda elétrica (figura 7.1) provocou-se um maior aproveitamento do grupo gerador e do chiller de absorção fazendo com que o chiller de compressão fosse menos utilizado (figura 7.2).

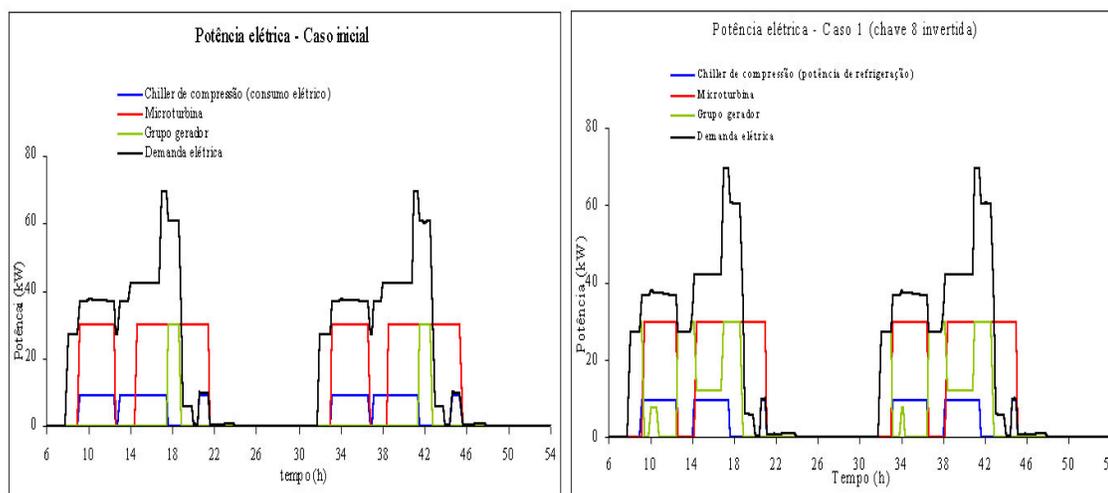


Figura 7.1: Potência elétrica no caso inicial e no caso 1 (chave 8 invertida)

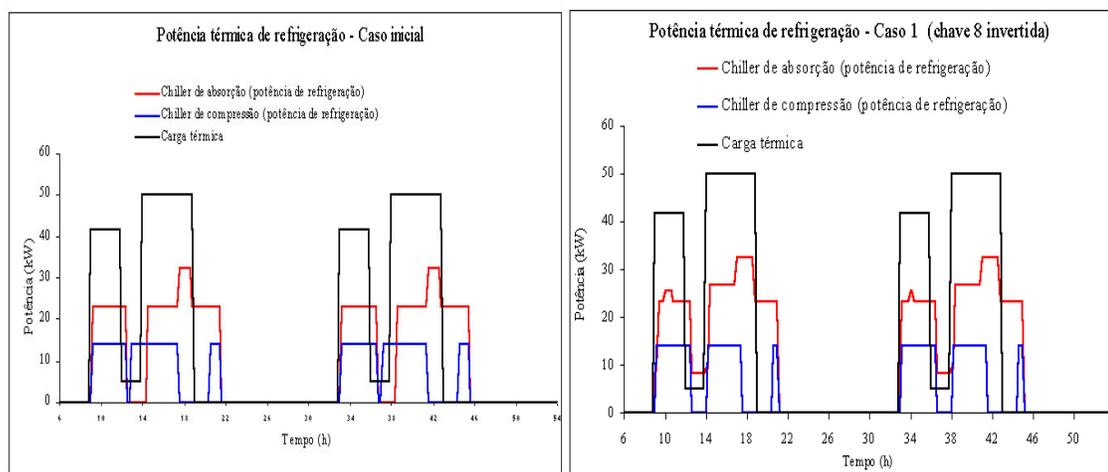


Figura 7.2: Potência térmica de refrigeração no caso inicial e no caso 1 (chave 8 invertida)

O VPL do sistema convencional do caso 1 é igual ao do caso base (VPL = R\$ 420.920,00), pois os custos com investimento e com o consumo são os mesmos como apresenta a figura 7.3. O VPL do sistema de cogeração caso 1 com a chave 8 invertida (VPL = 410.960,00) é menor que o do caso base (R\$ 441.720,00). Como pode ser visto na figura 7.4, para o sistema de cogeração, os investimentos iniciais do caso 1 (chave 8 invertida) são iguais ao do caso base (R\$ 302290,00), contudo o custo de consumo (R\$ 2.400,00) é menor que no caso base (R\$ 3.070,00).

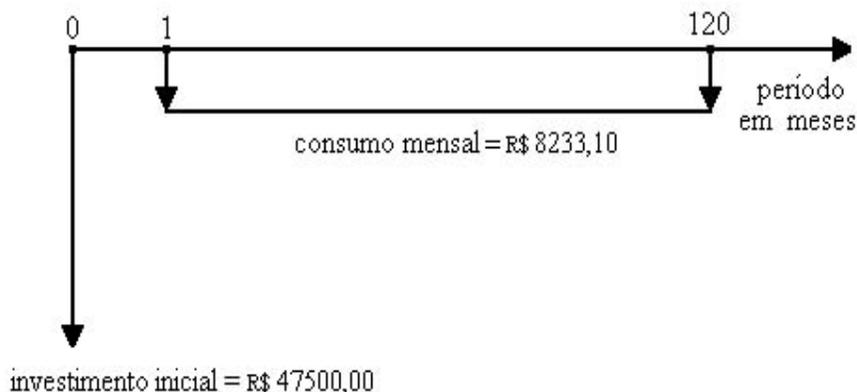


Figura 7.3 – Fluxo de caixa do sistema convencional no caso 1.

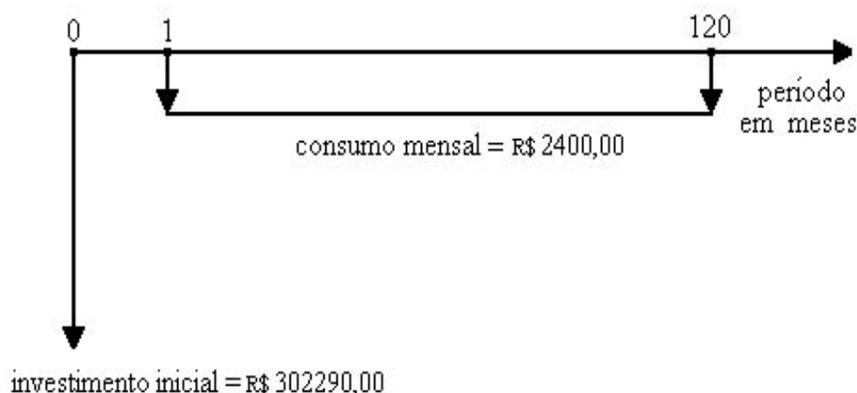


Figura 7.4 – Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1 (chave 8 invertida).

No caso base, o sistema convencional representa a melhor opção, mas com as inversões das chaves, é possível realizar duas formas de funcionamento do sistema de cogeração (duas inversões de chaves) em que este investimento será a melhor opção. A inversão da chave 8, mantendo as outras chaves na posição do caso base, foi o caso ótimo obtido apresentando uma economia de 2,5 %, em termos de valor presente, em relação ao sistema convencional. Esta economia é consideravelmente baixa para um capital muito alto a ser investido. Neste caso, além de dificuldades de desembolsar um valor muito alto no início do empreendimento, terá que ser assumido riscos para uma baixa recompensa em relação ao sistema convencional.

7.2 Estudo com variação das chaves e da demanda térmica

Procura-se verificar o que acontece ao sistema para uma demanda térmica diferente. Será possível verificar se o sistema de cogeração será novamente o ótimo e se ele for, qual inversão de chave terá o melhor resultado.

A demanda térmica usada neste caso é o dobro da usada no caso base e os resultados são apresentados na tabela 7.3, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 7.1.

Tabela 7.3: VPLs do caso estudado (caso 2)

	Caso 2 (VPL convencional = 596.780,00)		
	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
Posição 0	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 1	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 2	506.820,00	204.530,00	18 %
Chave 3	-1	-1	-1
Chave 4	515.830,00	213.540,00	23 %
Chave 5	-1	-1	-1
Chave 6	-1	-1	-1
Chave 7	566.690,00	264.400,00	52 %
Chave 8	475.720,00	173.430,00	0 %
Chave 9	491.110,00	188.820,00	9 %
Chave 10	475.740,00	173.450,00	0 %
Chave 11	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 12	505.260,00	202.970,00	17 %
Chave 13	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 14	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 15	-1	-1	-1
Chave 16	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 17	517.300,00	215.010,00	24 %
Chave 18	-1	-1	-1
Chave 19	515.380,00	213.090,00	23 %
Chave 20	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 21	-1	-1	-1
Chave 22	513.460,00	211.170,00	22 %
Chave 23	511.920,00	209.630,00	21 %
Chave 24	-1	-1	-1
Chave 25	503.540,00	201.250,00	16 %
Chave 26	503.800,00	201.510,00	16 %

Neste caso (carga térmica dobrada), ocorre insuficiência de geração de frio com as seguintes mudanças de chaves: 5 (a microturbina modula a carga, não gerando todo o calor necessário para o chiller de absorção), 6 (a microturbina está limitada à demanda elétrica), 15 (o chiller de absorção só é ligado quando ocorre carga térmica), 18 (o chiller de absorção não pode gerar mais que a carga térmica), 21 (o chiller de compressão somente liga quando há carga térmica) e 24 (o chiller de compressão não pode gerar mais do que a carga térmica).

Na tabela 7.3, nota-se que quando a chave 3 foi invertida, a microturbina deixou de ser ligada sempre que a temperatura do reservatório esteve acima de 9 graus Celsius, não sendo ligada em nenhuma opção. Com isso, apenas o grupo gerador ligou, disponibilizando uma quantidade menor de energia para o chiller de absorção e diminuindo a energia total de frio gerada durante o dia.

Para este segundo estudo, o caso ótimo também ocorre quando todas as chaves estão posicionadas no caso base e chave 8 encontra-se invertida. No caso base, então, o gasto com consumo (em valor presente) é 16% maior que no caso ótimo.

As mudanças nas chaves 8 (o grupo gerador é ligado sempre que percebe demanda elétrica) e 10 (o grupo gerador é ligado o tempo todo, mas sempre limitado pela demanda elétrica porque a chave 12 está na posição 0) tem o mesmo efeito: fazer com que, durante o

dia, quando a demanda elétrica é maior que a geração da turbina, o grupo gerador também gere energia elétrica.

O grupo gerador, no caso base, foi configurado para ligar quando houver horário de ponta. Quando a chave 8 foi invertida o motor também passou a ligar quando ocorresse demanda elétrica. Isto causou um maior aproveitamento do grupo gerador, que apesar de aumentar o consumo de combustível diminuiu o uso do chiller de compressão.

O VPL do sistema convencional torna-se bem maior que o do caso base. O acréscimo ocorre tanto no custo de investimento (a potência do chiller de compressão dobra) como no custo de consumo (devido à energia elétrica consumida pelo chiller de compressão), porém a variação nos custos de investimentos é maior que a dos custos de consumo. As figuras 7.5 e 7.6 mostram, para o caso 2, o fluxo de caixa do sistema convencional e do sistema de cogeração com a chave na posição ótima.

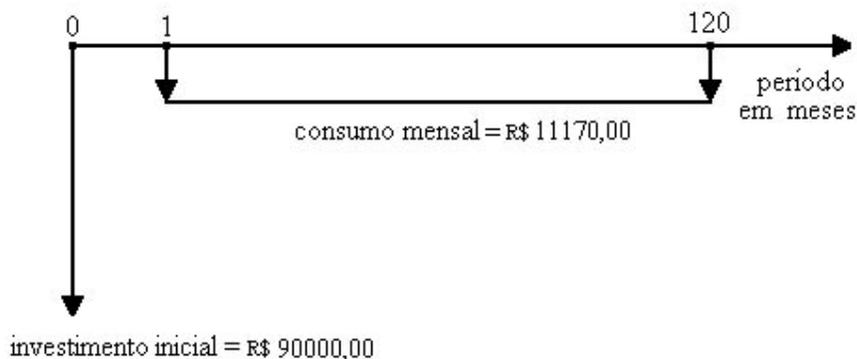


Figura 7.5: Fluxo de caixa do sistema convencional no caso 2.

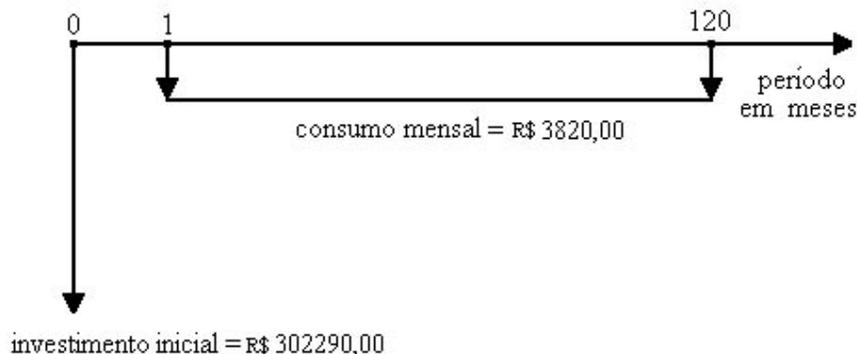


Figura 7.6: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 2 (chave 8 invertida).

Para o sistema de cogeração os investimentos iniciais do caso 2 (chave 8 invertida) são iguais ao do caso base (R\$ 302.290,00). Contudo o custo de consumo do caso 2 na configuração ótima (R\$ 3.820,00) é maior que no caso base (R\$ 3.070,00). Isto ocorre devido a uma maior utilização do chiller de compressão neste caso em relação ao caso base, como pode ser comparado na figura 7.7. É possível também verificar este fato pelo gráfico da demanda elétrica (figuras 7.8), onde as duas demandas elétricas são diferentes por causa do chiller de compressão que trabalha mais tempo no caso 2, pois está configurado para ligar quando a temperatura do termoacumulador de água fria estiver acima de 9° C.

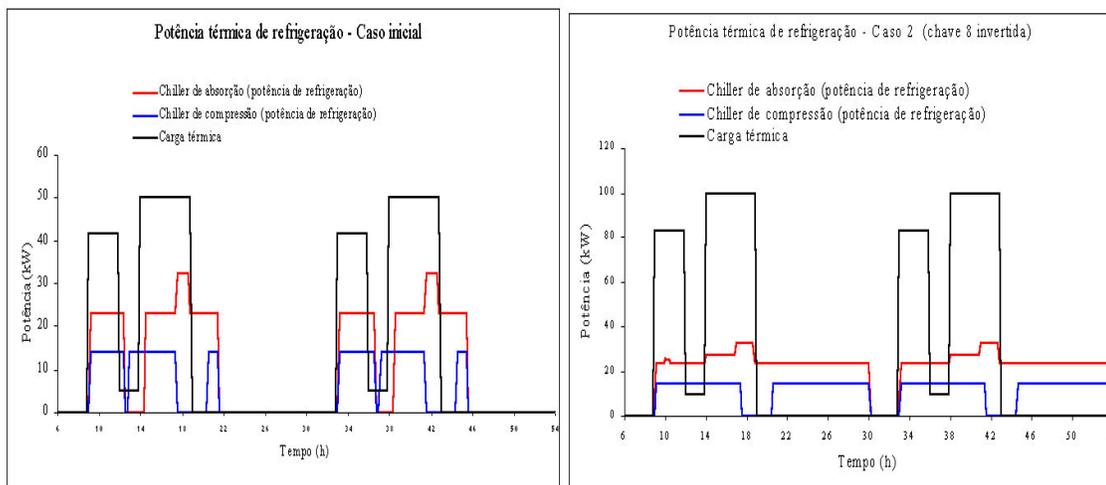


Figura 7.7: Potência térmica de refrigeração no caso inicial e no caso 2 (chave 8 invertida)

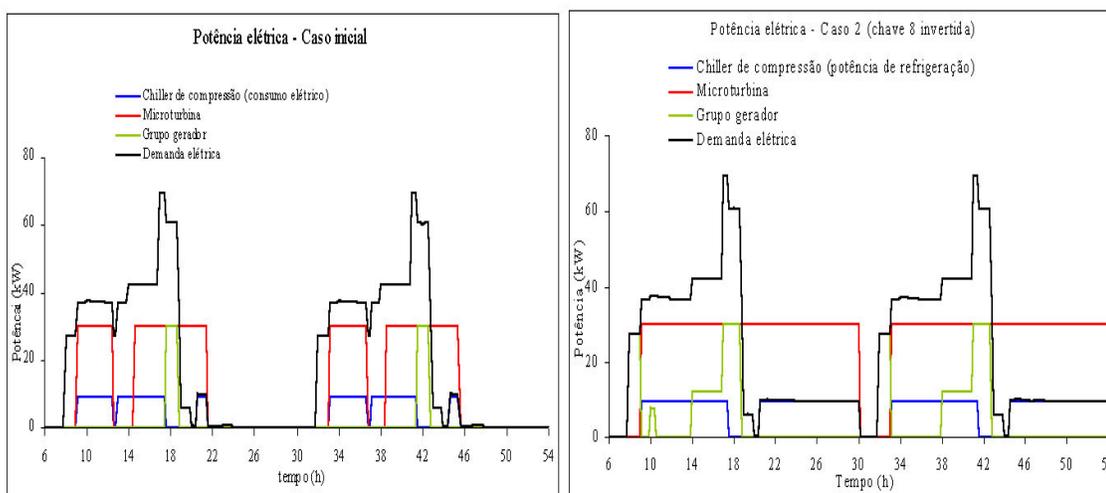


Figura 7.8: Potência elétrica no caso inicial e no caso 2 (chave 8 invertida)

Como a demanda térmica no caso 2 é o dobro da que ocorre no caso base, a temperatura do termoacumulador ficará mais alta, pois a atuação deste dispositivo será maior, tornando mais difícil para o chiller de absorção abaixar sua temperatura até os 9 °C (figuras 7.9).

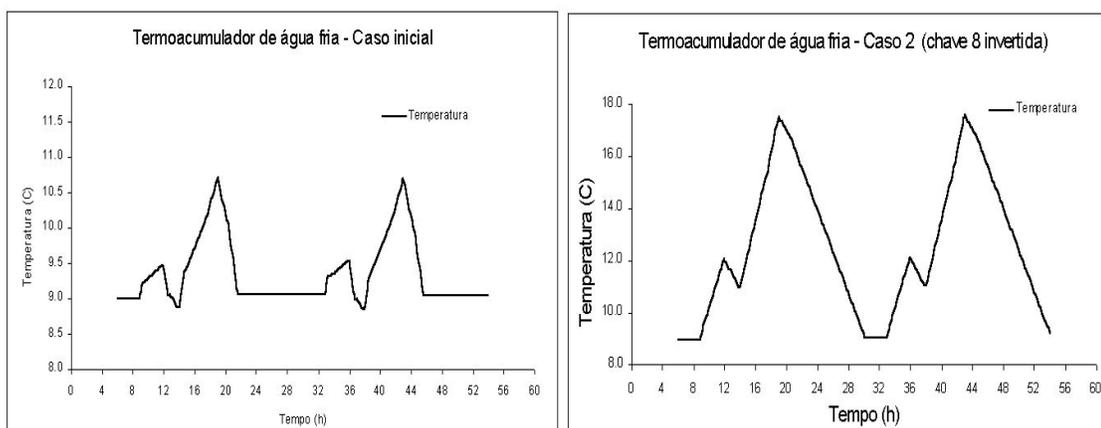


Figura 7.9: Temperatura do termoacumulador no caso inicial e no caso 2 (chave 8 invertida)

Para diminuir a variação da temperatura no termoacumulador (caso a temperatura máxima seja muito alta para refrigeração) deve-se aumentar a massa do reservatório. O aumento da massa implicaria em um aumento no valor do investimento inicial. Isto poderia ser implementado no modelo para ser realizado automaticamente ou manualmente, caso a caso.

Para o sistema convencional o investimento inicial do caso 2 é igual a R\$ 90.000,00 e do caso base é igual a R\$ 47.500,00. O custo de consumo do sistema convencional no caso 2 é igual a R\$ 11.170,00 e do caso base é igual a R\$ 8.233,10.

A demanda térmica, quando dobrada, provoca uma elevação acentuada dos custos de investimento do sistema convencional (90%). Ocorre um acréscimo menos acentuado para os custos de consumo (36%) do sistema convencional, enquanto que para o sistema de cogeração é de 27%. Com isto, pode-se afirmar que um aumento na demanda de energia térmica fará com que o VPL do sistema de cogeração tenda a ser menor que do sistema convencional, ou seja, com o aumento da demanda térmica os custos do sistema convencional crescem mais rápido que os do sistema de cogeração.

Em situações em que a demanda térmica é acentuada, o sistema de cogeração é a opção mais provável de ser o melhor investimento. Neste caso estudado, todas as inversões de chaves no sistema de cogeração apresentaram melhores resultados que o sistema convencional. A inversão da chave 8, mantendo as outras chaves na posição do caso base, foi o caso ótimo obtido apresentando uma economia de 20,3 %, em termos de valor presente, em relação ao sistema convencional. A economia proporcionada é consideravelmente alta, tornando incentivador o uso do sistema de cogeração quando existe uma demanda térmica mais acentuada, mesmo que o investimento inicial seja bastante alto.

7.3 Estudo com variação das chaves e da demanda elétrica

Neste caso procura-se verificar o que acontece ao sistema se for necessário aumentar a demanda elétrica. Será possível verificar se o sistema de cogeração será novamente o ótimo e, neste caso, qual inversão de chave terá o melhor resultado.

A demanda elétrica usada é o dobro da usada no caso base. Os resultados são apresentados na tabela 7.4, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados daqueles apresentados na seção 7.1.

Tabela 7.4: VPLs do caso estudado (caso 3)

	Caso 3 (VPL convencional = 650.220,00)		
	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
Posição 0	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 1	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 2	689.050,00	386.760,00	15 %
Chave 3	-1	-1	-1
Chave 4	742.410,00	440.120,00	31 %
Chave 5	659.880,00	357.590,00	6 %
Chave 6	659.650,00	357.360,00	6 %
Chave 7	730.780,00	428.490,00	28 %
Chave 8	638.210,00	335.920,00	0 %
Chave 9	642.690,00	340.400,00	1 %
Chave 10	638.240,00	335.950,00	0 %
Chave 11	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 12	667.840,00	365.550,00	9 %

Tabela 7.4: continuação

Chave 13	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 14	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 15	693.800,00	391.510,00	17 %
Chave 16	667.720,00	365.430,00	9 %
Chave 17	670.760,00	368.470,00	10 %
Chave 18	699.830,00	397.540,00	18 %
Chave 19	681.730,00	379.440,00	13 %
Chave 20	668.700,00	366.410,00	9 %
Chave 21	671.690,00	369.400,00	10 %
Chave 22	741.490,00	439.200,00	31 %
Chave 23	668.490,00	366.200,00	9 %
Chave 24	672.700,00	370.410,00	10 %
Chave 25	667.940,00	365.650,00	9 %
Chave 26	667.350,00	365.060,00	9 %

Quando a carga elétrica foi dobrada, as variações do “VPL Consumo” do caso 3 foram inferiores daqueles dos casos 1 e 2. Enquanto que a média aritmética das porcentagens dos VPLs de consumo ótimo (o acréscimo no gasto com energia elétrica e combustível que ocorre entre a chave invertida ótima daquele caso estudado e a célula em questão) dos casos 1 e 2 foram respectivamente 33,9% e 12,8%, no caso 3 esta média é de 10,8 %. Isto ocorre porque, para todas inversões de chaves, existe uma parcela alta da demanda elétrica que não é suprida sendo comprada da rede elétrica de distribuição. Então, é gerado um custo de consumo para todos os casos proveniente da diferença entre a demanda ocorrida e a potência máxima que as duas máquinas térmicas juntas são capazes de gerar.

Observando a tabela 7.4, nota-se novamente que quando a chave 3 foi invertida, a microturbina deixou de ser ligada sempre que a temperatura do reservatório esteve acima de 9 graus Celsius, não sendo ligada em nenhuma opção. Com isso, apenas o grupo gerador ligou, disponibilizando uma quantidade menor de energia para o chiller de absorção e diminuindo a energia total de frio gerada durante o dia.

Para este terceiro estudo, o caso ótimo, no sistema de cogeração, também ocorre quando todas as chaves estão posicionadas no caso base e a chave 8 encontra-se invertida. No caso base, então, o gasto com consumo (em valor presente) é 9% maior que no caso ótimo.

As mudanças nas chaves 8 (o grupo gerador é ligado sempre que percebe demanda elétrica) e 10 (o grupo gerador é ligado o tempo todo, mas sempre limitado pela demanda elétrica porque a chave 12 está na posição 0) tem o mesmo efeito: fazer com que, durante o dia, quando a demanda elétrica é maior que a geração da turbina, o grupo gerador também gere energia elétrica.

O grupo gerador, no caso base, foi configurado para ligar quando houver horário de ponta. Quando a chave 8 foi invertida o motor também passou a ligar quando ocorresse demanda elétrica. Isto causou um maior aproveitamento do grupo gerador. Desta forma, como a diferença entre a demanda elétrica e a geração da microturbina (que é a demanda elétrica percebida pelo motor, já que a chave 25 está na posição 0) era considerável, o motor ficou ligado praticamente o dia todo (figura 7.10).

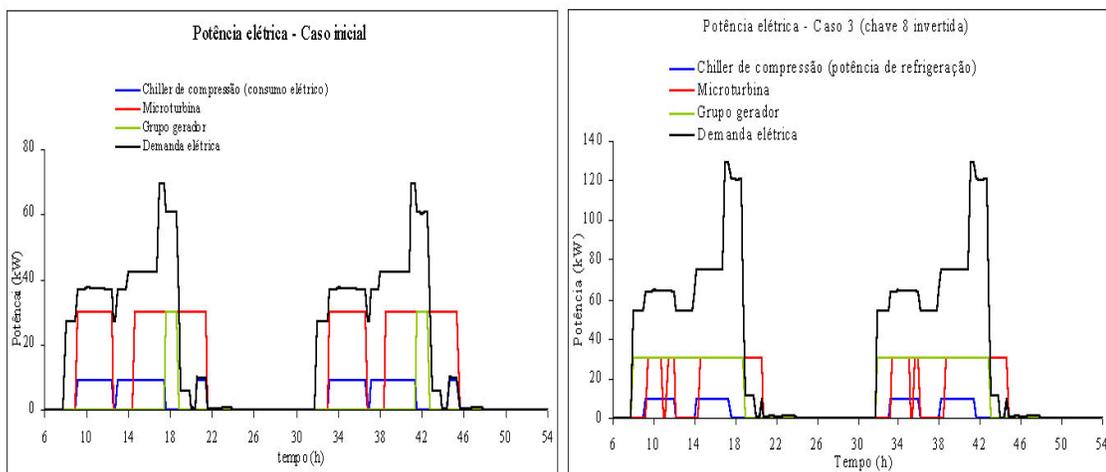


Figura 7.10: Potência elétrica no caso inicial e no caso 3 (chave 8 invertida)

Como o motor ficou mais tempo ligado, o chiller de absorção recebeu uma maior oferta de gases de exaustão aumentando a sua atuação no sistema e diminuindo o uso do chiller de compressão em relação ao caso base (figura 7.11).

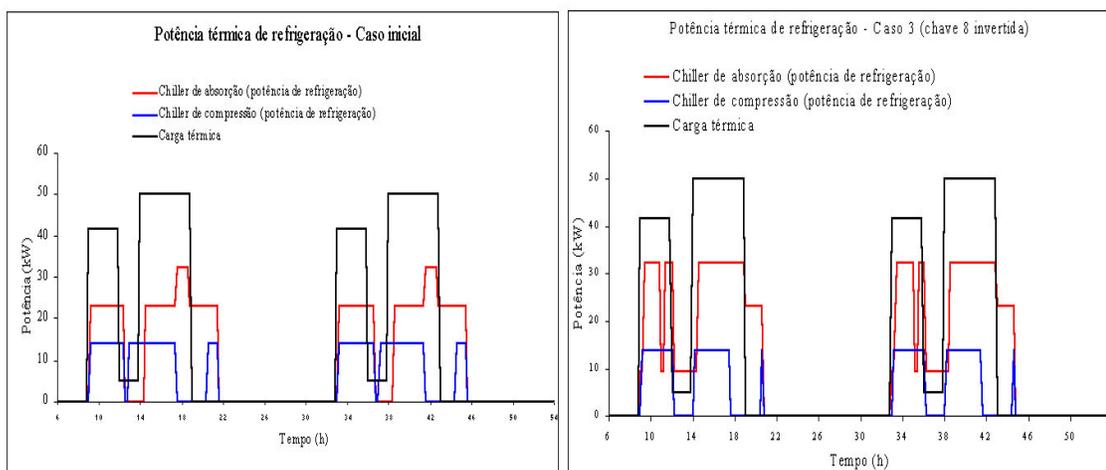


Figura 7.11: Potência térmica de refrigeração no caso inicial e no caso 3 (chave 8 invertida)

O VPL do sistema convencional torna-se bem maior que o do caso base. O custo de investimento permanece constante, pois o chiller de compressão utilizado é o mesmo. O custo de consumo é o responsável pelo acréscimo no VPL devido ao gasto com a compra da energia elétrica da rede de distribuição ser praticamente dobrada (não é exatamente dobrada em relação ao caso base devido à potência consumida pelo chiller de compressão e com o aquecimento da água serem os mesmos). As figuras 7.12 e 7.13 mostram, para o caso 3, o fluxo de caixa do sistema convencional e do sistema de cogeração com a chave na posição ótima.

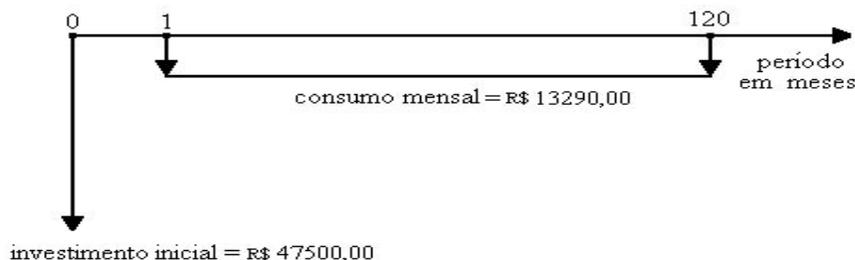


Figura 7.12 – Fluxo de caixa do sistema convencional no caso 3.

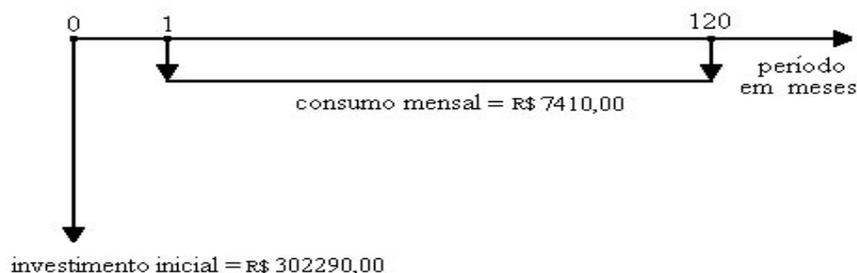


Figura 7.13 – Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 3 (chave 8 invertida).

Para o sistema de cogeração, os investimentos iniciais do caso 3 (chave 8 invertida) são iguais ao do caso base (R\$ 302.290,00). Contudo o custo de consumo do caso 3 com a chave 8 invertida (R\$ 7.410,00) é mais que o dobro do custo de consumo do caso base (R\$ 3.070,00). O custo de consumo realizado no caso base deveria ser maior, pois no caso base o grupo gerador liga apenas no horário de ponta e no caso 3 (chave 8 invertida) liga no horário de ponta e quando ocorre demanda elétrica (demanda total menos a potência gerada pela microturbina) fazendo com que ocorra uma melhor utilização do grupo gerador. Isto não ocorre porque o custo de consumo inserido com a compra de energia elétrica da rede de distribuição supera a economia realizada com o melhor uso do grupo gerador.

A melhor utilização do grupo gerador, e por sua vez do chiller de absorção, fazendo com que o custo com energia elétrica utilizado para suprir a demanda térmica diminua, pode ser evidenciado quando comparados à evolução da temperatura do termoacumulador de água fria do caso 3 (chave 8 invertida) e do caso base (figura 7.14).

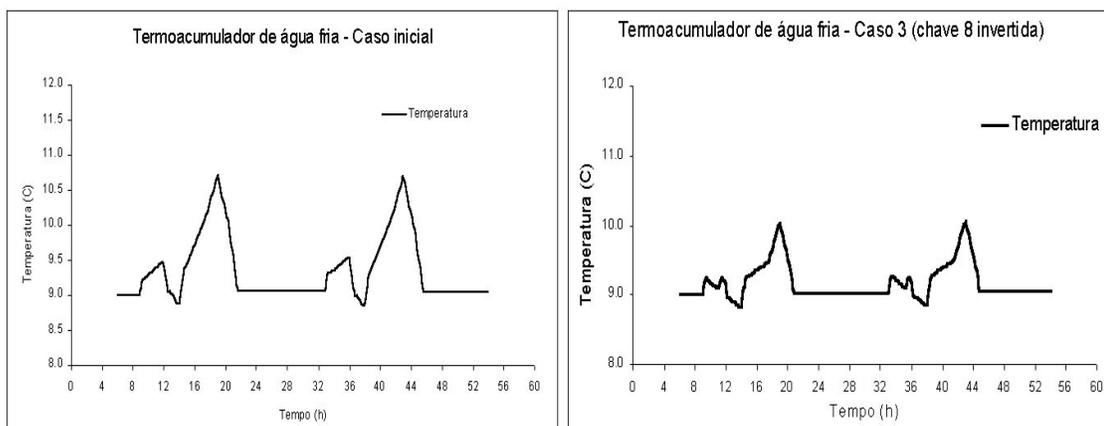


Figura 7.14: Temperatura do termoacumulador no caso inicial e no caso 3 (chave 8 invertida)

Quando ocorreu a duplicação da demanda de energia elétrica, o sistema de cogeração mostrou-se a melhor opção de investimento em apenas três inversões de chaves (chaves 8, 9, 10). A inversão da chave 8, mantendo as outras chaves na posição do caso base, foi o caso ótimo obtido apresentando uma economia de 1,8 % ,em termos de valor presente, em relação ao sistema convencional. Esta economia é consideravelmente baixa para um capital muito alto a ser investido. Neste caso, além de dificuldades de desembolsar um valor muito alto no início do empreendimento, terá que ser assumido riscos para uma baixa recompensa em relação ao sistema convencional.

7.4 Estudo com variação das chaves e da tarifa elétrica

Procura-se verificar o que acontece ao sistema se ocorrer um aumento no preço da tarifa de energia elétrica. Será possível verificar se o sistema de cogeração será novamente o ótimo e, neste caso, qual inversão de chave terá o melhor resultado.

A tarifa de energia elétrica usada neste caso é o dobro da usada no caso base e os resultados são apresentados na tabela 7.5, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados daqueles apresentados na seção 7.1.

Tabela 7.5: VPLs do caso estudado (caso 4)

	Caso1 (VPL convencional = 794.330,00)		
	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
Posição 0	505.480,00	203.190,00	65 %
Chave 1	505.480,00	203.190,00	65 %
Chave 2	508.960,00	206.670,00	68 %
Chave 3	-1	-1	-1
Chave 4	562.210,00	259.920,00	112 %
Chave 5	497.280,00	194.990,00	59 %
Chave 6	520.040,00	217.750,00	77 %
Chave 7	635.040,00	332.750,00	171 %
Chave 8	425.230,00	122.940,00	0 %
Chave 9	497.730,00	195.440,00	59 %
Chave 10	425.230,00	122.940,00	0 %
Chave 11	507.580,00	205.290,00	67 %
Chave 12	507.190,00	204.900,00	67 %
Chave 13	505.480,00	203.190,00	65 %
Chave 14	505.480,00	203.190,00	65 %
Chave 15	532.330,00	230.040,00	87 %
Chave 16	505.480,00	203.190,00	65 %
Chave 17	509.190,00	206.900,00	68 %
Chave 18	526.640,00	224.350,00	83 %
Chave 19	539.820,00	237.530,00	93 %
Chave 20	497.480,00	195.190,00	59 %
Chave 21	508.270,00	205.980,00	68 %
Chave 22	694.190,00	391.900,00	219 %
Chave 23	500.800,00	198.510,00	62 %
Chave 24	502.540,00	200.250,00	63 %
Chave 25	505.280,00	202.990,00	65 %
Chave 26	507.430,00	205.140,00	67 %

Observando a tabela 7.5, nota-se que quando a chave 3 foi invertida, a microturbina deixou de ser ligada sempre que a temperatura do reservatório esteve acima de 9 graus Celsius, não sendo ligada em nenhuma opção. Com isso, apenas o grupo gerador ligou, disponibilizando uma quantidade menor de energia para o chiller de absorção e diminuindo a energia total de frio gerada durante o dia.

Para este quarto estudo, o caso ótimo, no sistema de cogeração, também ocorre quando todas as chaves estão posicionadas no caso base e a chave 8 encontra-se invertida. No caso base, então, o gasto com consumo (em valor presente) é 65% maior que no caso ótimo.

As mudanças nas chaves 8 (o grupo gerador é ligado sempre que percebe demanda elétrica) e 10 (o grupo gerador é ligado o tempo todo, mas sempre limitado pela demanda elétrica porque a chave 12 está na posição 0) tem o mesmo efeito: fazer com que, durante o dia, quando a demanda elétrica é maior que a geração da turbina, o grupo gerador também gere energia elétrica.

Neste caso, na chave 7, o grupo gerador não entra no horário de ponta porque a chave 7 está na posição 0 (o motor negligencia se é horário de ponta ou não) e a chave 8 também está na posição 0 (o motor negligencia se há ou não carga elétrica). Desta forma, neste caso, o sistema deve comprar uma quantidade maior de energia elétrica da rede no horário de ponta, quando esta é mais cara. Já quando a chave 7 está a posição normal (posição 1) e a chave 8 é modificada (posição 0) ocorre o contrário, o motor liga na existência de demanda elétrica e quando entra no horário de ponta, fazendo com que o sistema compre menos energia elétrica, que é mais cara.

O cenário, do ponto de vista técnico, é o mesmo que ocorre no caso 1. As curvas obtidas relativas à demanda elétrica e térmica e às potências realizadas pelos equipamentos são iguais às que ocorrem no caso 1, como pode ser visto nas figuras 7.15 e 7.16.

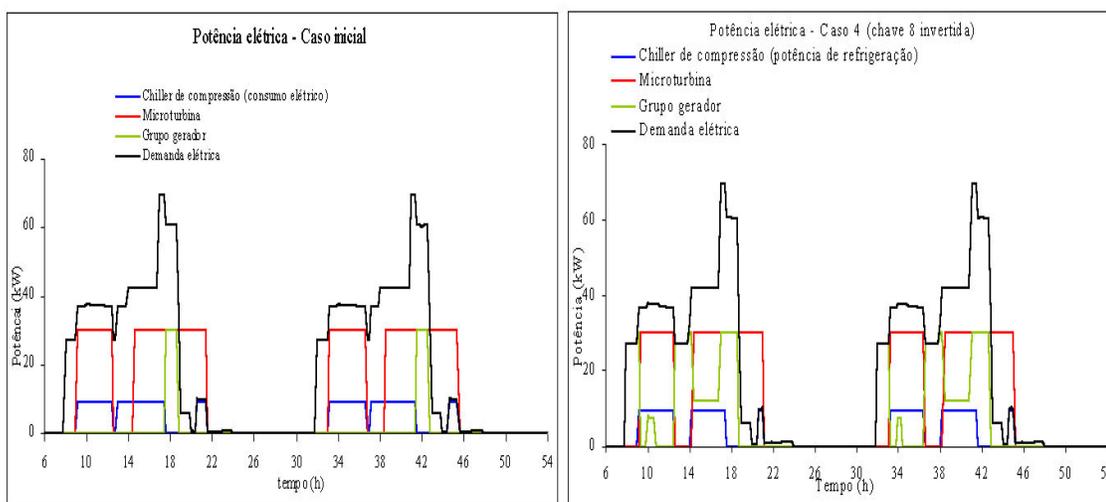


Figura 7.15: Potência elétrica no caso inicial e no caso 4 (chave 8 invertida)

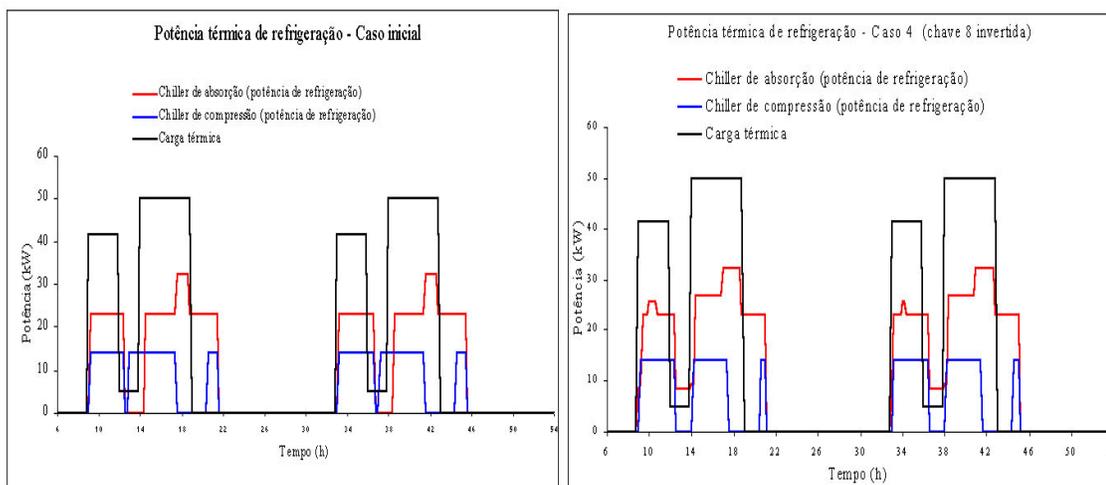


Figura 7.16: Potência térmica de refrigeração no caso inicial e no caso 4 (chave 8 invertida)

Só ocorre diferença no ponto de vista financeiro. O custo de consumo do sistema convencional dobra em relação ao caso 1 e em relação ao caso base (figura 7.17) e o VPL só não é duplicado porque o custo de investimento se mantém o mesmo.

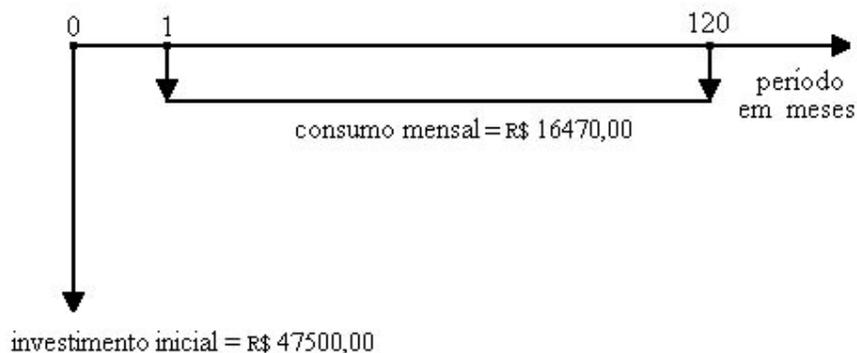


Figura 7.17 – Fluxo de caixa do sistema convencional no caso 4.

Enquanto o VPL do sistema convencional praticamente dobrou em relação ao caso base, o VPL do sistema de cogeração continuou inferior em relação ao mesmo (figura 7.18). O VPL do caso 1 (chave 8 invertida) foi de R\$ 410.960,00 e no caso 4, na mesma inversão de chave, o VPL foi de (425.230,00), ou seja, o impacto provocado pelo aumento na tarifa com o uso do sistema de cogeração, nesta configuração é de apenas (3,5 %). Este aumento sentido pelo sistema de cogeração (caso 4, chave 8 invertida) ocorre devido ao uso do chiller de compressão para atender à demanda térmica.

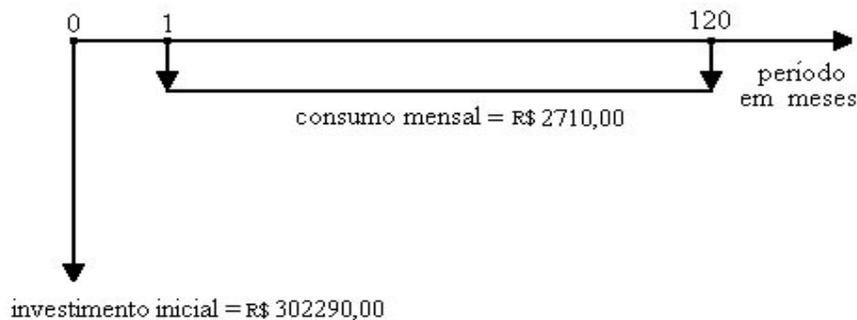


Figura 7.18 – Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 4 (chave 8 invertida).

É de se imaginar que havendo um aumento na tarifa de energia elétrica e mantendo-se a tarifa do combustível constante, a opção de investimento no sistema convencional fica bastante comprometida. Neste caso é importante que as duas máquinas térmicas fiquem ligadas o tempo máximo possível para consumir o mínimo de energia da rede de distribuição e também para que o chiller de absorção tenha uma maior oferta de gases de exaustão e assim diminuindo o uso do chiller de compressão. A inversão da chave 8, mantendo as outras chaves na posição do caso base, foi o caso ótimo obtido apresentando uma economia de 46,5 %, em termos de valor presente, em relação ao sistema convencional. A economia proporcionada é incentivadora do uso do sistema de cogeração mesmo que o investimento inicial seja bastante alto.

7.5 Conclusão

Observando os quatro casos estudados, é possível verificar que o sistema de cogeração foi melhor que o sistema convencional em termos financeiros. É possível observar que no caso base o sistema convencional é melhor que o de cogeração. A partir deste fato, fica clara a importância de realizar o estudo na forma de operação dos equipamentos do sistema de cogeração, pois com demandas variáveis (o que ocorre na realidade), o VPL é totalmente influenciado com a variação da forma de operação dos equipamentos. Também foi observado que, em todos os casos, o VPL ótimo ocorreu com inversão da chave 8 enquanto as outras chaves permaneciam na posição do caso base (a inversão da chave 10 possui o mesmo resultado da chave 8).

O gráfico de barras (figura 7.19) apresenta a porcentagem do acréscimo no VPL de consumo de cada inversão de chave em relação à ótima, para cada um dos quatro casos. Nesta figura percebe-se que, na maioria das inversões de chaves, é mantida uma relação entre os casos, ou seja, quando, num determinado caso, a inversão de chave provoca um aumento na porcentagem relativa à chave ótima, o mesmo ocorre com os três casos restantes. Na maioria das vezes em que este fato não ocorre, é provocado pelo não atendimento do sistema de cogeração (VPL igual a -1) à demanda térmica requisitada.

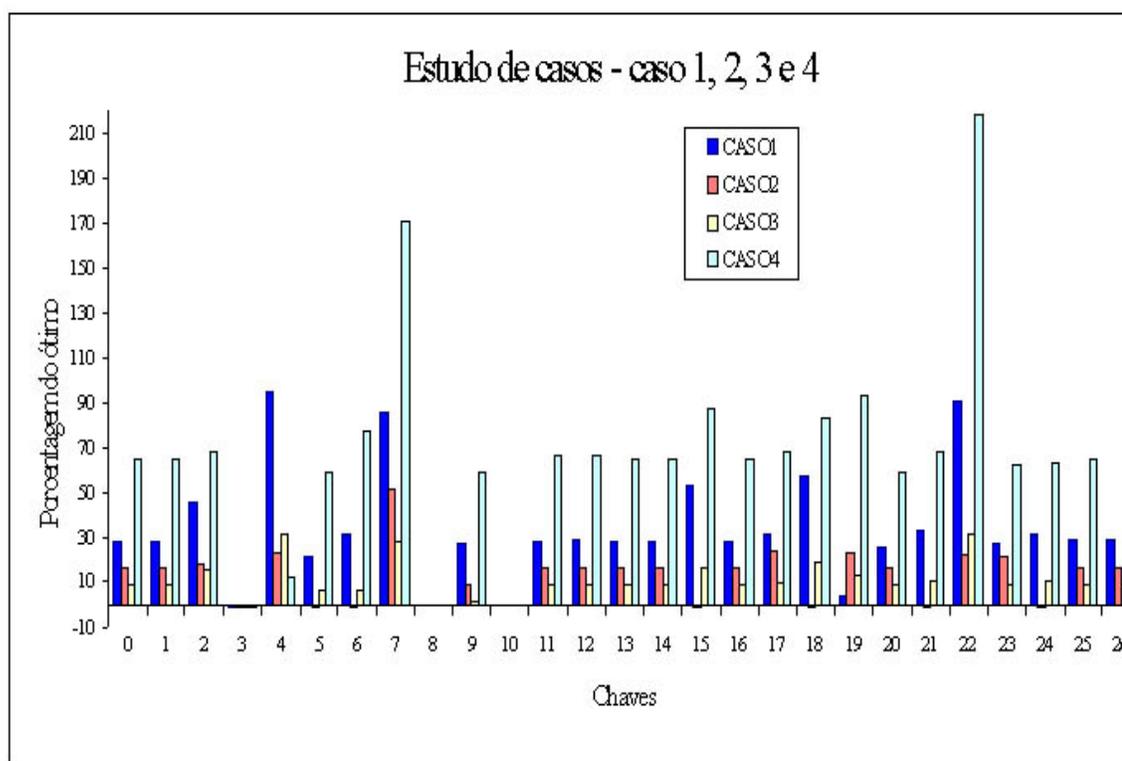


Figura 7.19: Porcentagem do acréscimo no VPL de consumo de cada inversão de chave em relação à ótima

Outra forma de visualizar este fato é transformando o gráfico de barras em curvas (figura 7.20). Pode-se observar que as curvas possuem um formato semelhante na maioria das chaves, ou seja, cada inversão de chave provoca uma resposta semelhante do sistema para todos os casos.

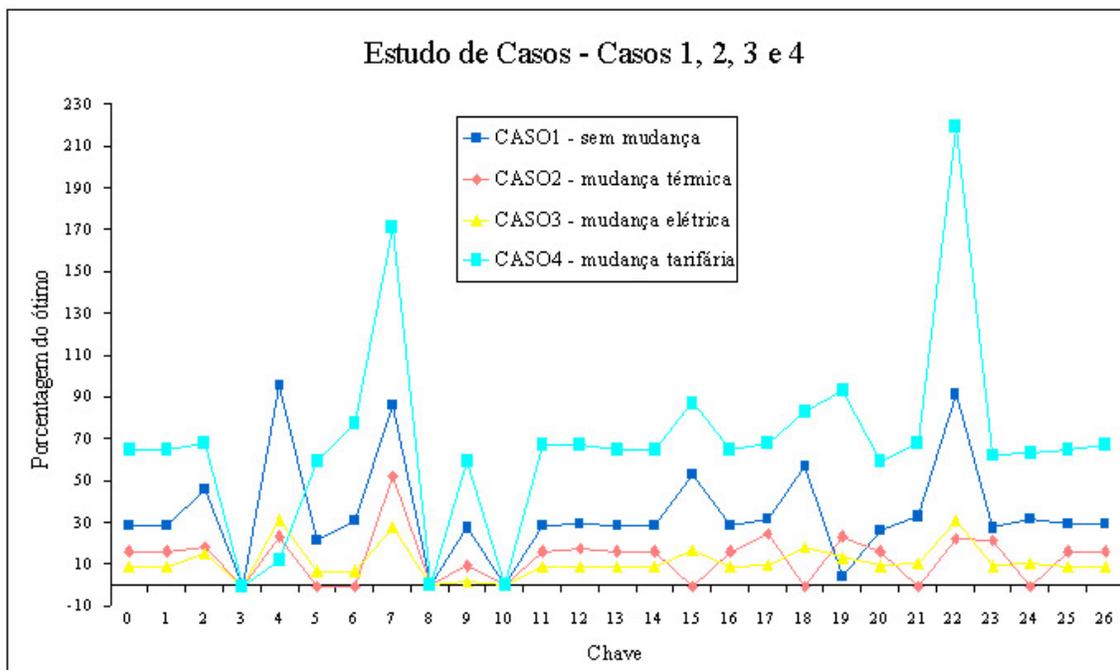


Figura 7.20: Porcentagem do acréscimo no VPL de consumo de cada inversão de chave em relação à ótima

Esta forma de variação dos resultados pode estar acusando uma tendência. É possível que, para qualquer caso simulado, a curva obtida seja semelhante às curvas apresentadas na figura 7.20. Se isto realmente ocorre, algumas inversões de chaves podem ser eleitas como mais prováveis de promoverem o resultado ótimo. Através de um estudo mais extenso, com variações de demandas em função das potências dos equipamentos, pode ser montado um mapa onde, para cada relação entre a soma das potências dos equipamentos (soma das potências das máquinas térmicas e a soma das potências dos chillers) e as suas respectivas demandas (demandas elétricas e demanda térmicas), será utilizada a otimização de apenas um grupo escolhido de chaves. Para cada relação potência versus demanda, o modelo terá armazenado quais chaves serão utilizadas na otimização. Desta forma, o número de chaves pode ser reduzido e assim o tempo de execução do programa também diminuirá. Se o número de chaves for reduzido de 27 para 10, o tempo de execução passará da ordem de anos para a ordem de horas, tornando mais viável a sua utilização do modelo na análise de projetos.

8. ESTUDO DE CASOS – OTIMIZAÇÃO

Esta seção mostra a segunda bateria de estudos realizados no modelo usando como referência o caso base apresentado no capítulo 6 (tabela 6.3). Os estudos consistem no uso da otimização de um número restrito de chaves contidas no módulo de configuração de tarefas e se subdividem em duas partes principais. A primeira parte consiste na otimização de um grupo de cinco chaves para cinco variações das potências das máquinas térmicas gerando um total de 160 ($5 \cdot (2^5)$) combinações. A segunda parte consiste na otimização de um outro grupo de cinco chaves, baseando-se na potência da máquina térmica que obteve o caso ótimo dentre os cinco casos estudados na primeira parte, e utilizando a variação da demanda térmica, da demanda elétrica, da tarifa de energia elétrica e da tarifa do combustível, de forma a obter oito casos com cinco chaves a serem combinadas cada um gerando um total de 256 ($8 \cdot (2^5)$) combinações. Estes perfis de demanda elétrica e térmica, e as tarifas de energia elétrica e do combustível serão, sucessivamente, ora dobrados e ora reduzidos à metade. Em outras palavras, será estudado o que ocorre quando as condições de projeto mudam após a implementação do mesmo. Cada um dos dois casos estudados (tabela 8.1) será apresentado em uma seção diferente e cada posição de chave apresentará um resultado (VPL).

Tabela 8.1: Casos estudados

Caso 1	Este caso se subdivide em 5 partes fazendo otimização das chaves 2, 3, 8, 11 e 12 (na posição original do caso base) e com:
Caso 1.1	A potência nominal da máquina térmica 1 igual a 0 kW e da máquina 2 igual a 60 kW
Caso 1.2	A potência nominal da máquina térmica 1 igual a 30 kW e da máquina 2 igual a 30 kW
Caso 1.3	A potência nominal da máquina térmica 1 igual a 60 kW e da máquina 2 igual a 0 kW
Caso 1.4	A potência nominal da máquina térmica 1 igual a 0 kW e da máquina 2 igual a 90 kW
Caso 1.5	A potência nominal da máquina térmica 1 igual a 90 kW e da máquina 2 igual a 0 kW
Caso 2	Este caso se subdivide em 8 partes fazendo otimização das chaves 8, 11, 12, 23 e 24 e utilizando a potência da máquina térmica ótima encontrada no caso 1 e com:
Caso 2.1	demanda elétrica reduzida à metade
Caso 2.2	demanda elétrica dobrada
Caso 2.3	demanda térmica reduzida à metade
Caso 2.4	demanda térmica dobrada
Caso 2.5	tarifa elétrica reduzida à metade
Caso 2.6	tarifa elétrica dobrada
Caso 2.7	tarifa do combustível reduzida à metade
Caso 2.8	tarifa do combustível dobrada

Nestes estudos serão geradas várias formas de resposta do modelo que, juntos formam um total de 416 VPLs. Será possível avaliar a influência da escolha das máquinas térmicas para um projeto, de acordo com o custo de investimento de cada uma e a forma que operam. Após a determinação da melhor combinação das máquinas térmicas, o sistema poderá ser avaliado em relação a situações anormais que podem ocorrer após a determinação do projeto, será visto quais as respostas do sistema diante destas novas condições de operação e o quanto às condições ótimas serão influenciadas.

8.1 Estudo com a variação da potência das máquinas térmicas.

O estudo se divide em cinco partes e cada uma está apresentada em uma seção diferente. É realizada a otimização de cinco chaves do módulo de configuração de tarefas juntamente com a variação da potência das máquinas térmicas. Realizando estas duas tarefas pode-se escolher qual o melhor equipamento (qual a melhor escolha de potências para as duas máquinas térmicas) dentre os estudados.

O caso base apresentado no capítulo 6 é utilizado como referência, sendo todos os seus dados utilizados exceto as potências das duas máquinas térmicas que serão variadas assim como as posições de chaves.

8.1.1 Primeira variação de potência (máquina térmica 1 igual a 0 kW e máquina térmica 2 igual a 60 kW).

Os equipamentos utilizados neste primeiro caso foram os mesmos do caso base (capítulo 6), porém só existe uma máquina térmica e um grupo gerador, ambos com potência nominal máxima igual a 60 kW.

A tabela 8.2 apresenta os resultados obtidos e pode-se observar nela que “VPLconvencional” significa o valor presente líquido total do sistema convencional onde toda a energia elétrica é comprada da rede pública (não há microturbina ou grupo gerador), todo o condicionamento de ar é gerado por sistemas de refrigeração com ciclos de compressão e não há armazenadores de frio. “VPL Total” indica o valor presente líquido total (investimento inicial mais consumo de energia elétrica e combustível traduzidos em valor presente) do sistema de microgeração proposto. “VPL consumo” indica o valor presente líquido apenas do consumo com energia elétrica e combustível. A diferença entre “VPL Total” e “VPL Consumo” é o valor presente líquido do investimento em equipamentos e a instalação.

As configurações que apresentam o valor -1 indicam casos em que a energia de refrigeração total gerada durante o dia (chiller de absorção mais o chiller de compressão) foi inferior à integração da carga térmica ao longo do dia; i.e., o sistema não conseguiu vencer a carga térmica imposta.

Na última coluna (porcentagem do VPL de consumo ótimo) é mostrado o acréscimo no gasto com energia elétrica e combustível que ocorre entre a chave invertida ótima daquele caso estudado (célula em destaque, na mesma coluna) e a célula em questão.

Tabela 8.2: VPLs do caso estudado (caso 1.1)

CHAVES					Caso 1.1 (VPL convencional = 420.920,00)		
2	3	8	11	12	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	0	0	1	1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	315.100,00	107.450,00	0%
0	0	1	1	0	322.180,00	114.530,00	7%
0	0	1	0	1	375.950,00	168.300,00	57%
0	0	1	0	0	322.180,00	114.530,00	7%
0	1	0	1	1	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	-1	-1	-1
0	1	0	0	0	-1	-1	-1
0	1	1	1	1	315.100,00	107.450,00	0%

Tabela 8.2: continuação

0	1	1	1	0	322.180,00	114.530,00	7%
0	1	1	0	1	375.950,00	168.300,00	57%
0	1	1	0	0	322.180,00	114.530,00	7%
1	0	0	1	1	-1	-1	-1
1	0	0	1	0	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	-1	-1	-1
1	0	0	0	0	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	315.100,00	107.450,00	0%
1	0	1	1	0	322.180,00	114.530,00	7%
1	0	1	0	1	375.950,00	168.300,00	57%
1	0	1	0	0	322.180,00	114.530,00	7%
1	1	0	1	1	-1	-1	-1
1	1	0	1	0	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	-1	-1	-1
1	1	0	0	0	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	315.100,00	107.450,00	0%
1	1	1	1	0	322.180,00	114.530,00	7%
1	1	1	0	1	375.950,00	168.300,00	57%
1	1	1	0	0	322.180,00	114.530,00	7%

As chaves 2 e 3 não exercem nenhuma influência sobre o sistema, pois elas controlam a máquina térmica 1 (microturbina), que neste caso não existe. Todas as vezes que a chave 8 permaneceu na posição 0, o grupo gerador entrou em funcionamento na mesma situação do caso base (liga apenas quando ocorrer o horário de ponta), fazendo com que o chiller de absorção (com baixa oferta de gases de exaustão) e o de compressão, não consigam suprir a demanda térmica. Com isto, as opções viáveis são aquelas em que a chave 8 está na posição 1 (liga quando houver demanda de energia elétrica). Diante desta situação existem apenas quatro combinações possíveis entre as chaves 11 e 12: Chave 11 igual a 1 e a chave 12 igual a 1 (modula a carga e pode gerar em excesso), chave 11 igual a 1 e a chave 12 igual a 0 (modula a carga e não pode gerar em excesso), chave 11 igual a 0 e a chave 12 igual a 1 (gera o máximo possível e pode gerar em excesso) e chave 11 igual a 0 e a chave 12 igual a 0 (gera o máximo possível e não pode gerar em excesso). As respostas do grupo gerador ao longo do período podem ser a potência igual a 0 (o equipamento desliga), a potência igual à mínima, a potência igual à carga térmica e a potência igual à máxima, de acordo com as combinações que podem ser realizadas entre as posições das chaves 11 e 12 e a carga a ser gerada (se a carga é menor que a mínima potência que pode ser gerada pela máquina térmica, se a carga está entre o mínimo e o máximo que a máquina térmica pode gerar e se a carga é maior que o máximo que a máquina térmica pode gerar). Existem nove respostas possíveis que podem ser visualizadas na tabela de decisões da tabela verdade (Tabela 4.3) apresentada no capítulo 4.

Observando a tabela de decisões da tabela verdade (Tabela 4.3) percebe-se que as combinações chave 11 igual a 1 com chave 12 igual a 0 e chave 11 igual a 0 com a chave 12 igual a 0 possuem o mesmo resultado independente da posição da carga em relação à potência do grupo gerador. O resultado obtido é apresentado na figura 8.1 e pode-se verificar que quando a carga é menor que a potência mínima do equipamento ele permanece desligado.

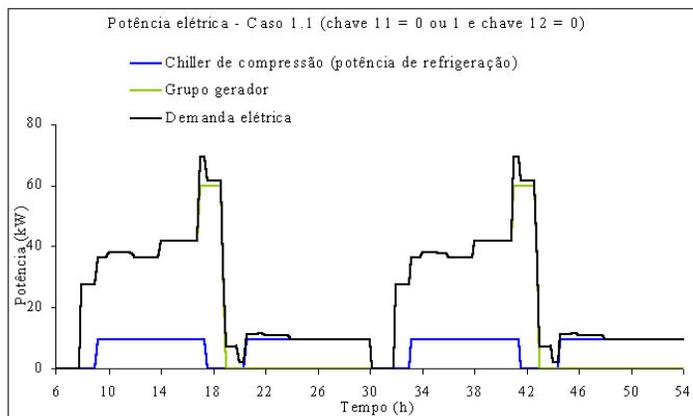


Figura 8.1: Potência elétrica no caso 1.1 (chave 11 = 0 ou 1 e chave 12 = 0).

Observando a figura 8.2, verifica-se que, como a chave 11 está na posição 1 e a chave 12 está na posição 1, o equipamento funciona com a potência igual à própria demanda elétrica se esta for igual ou superior à potência mínima que a máquina térmica pode gerar e se for menor ele funciona gerando a própria potência mínima.

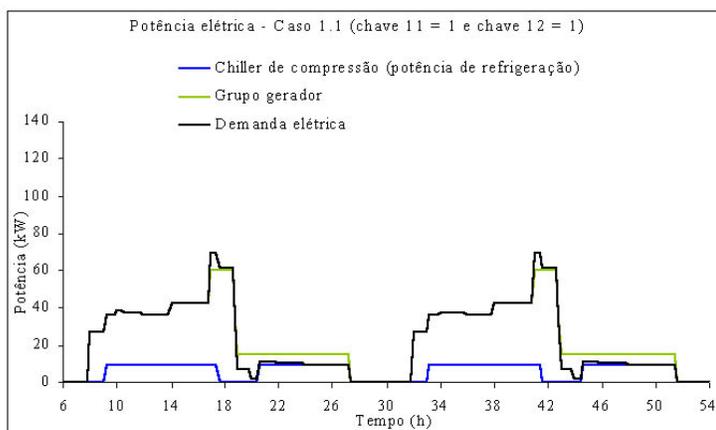


Figura 8.2: Potência elétrica no caso 1.1 (chave 11 = 1 e chave 12 = 1).

Na figura 8.3 é apresentada a potência elétrica quando a chave 11 é igual a 0 e a chave 12 é igual a 1. Com as chaves 11 e 12 nesta posição o grupo gerador funcionará com sua potência máxima sempre que for ligado.

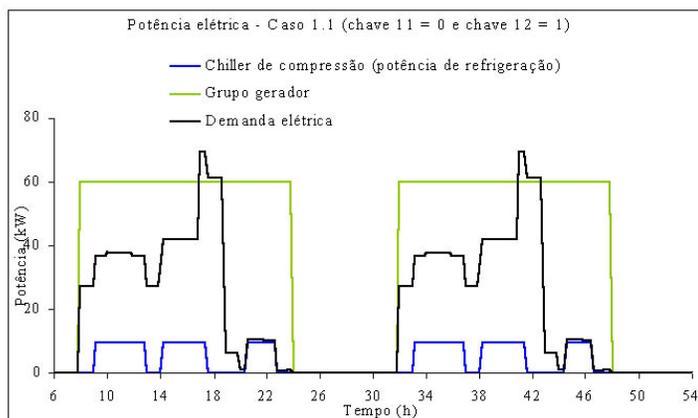


Figura 8.3: Potência elétrica no caso 1.1 (chave 11 = 0 e chave 12 = 1).

A situação mostrada na figura 8.3 (chave 11 = 0 e chave 12 = 1) é a pior combinação de chaves deste caso devido ao grupo gerador, quando ligado, funcionar sempre com a potência máxima, consumindo uma quantia expressiva de combustível desnecessariamente. Isto faz com que o seu VPL de consumo seja 55 % do VPL total. A situação mostrada na figura 8.2 (chave 11 = 1 e chave 12 = 1) é a melhor combinação de chaves deste caso, onde o grupo gerador é ligado com a potência mais adequada de acordo com a demanda elétrica. Um exemplo pode ser visualizado nos horários aproximados de 19:00 às 27:00 (figura 8.2), onde o grupo gerador funciona com a potência mínima quando ocorre uma demanda de energia elétrica provocada pelo chiller de compressão (14 kW), fazendo com que o chiller de absorção também funcione ajudando a abaixar a temperatura do termoacumulador, ou seja, o grupo gerador evita que energia seja comprada da rede de distribuição ao mesmo tempo em que ajuda o sistema de refrigeração a suprir a demanda térmica utilizando o mínimo possível de combustível. Este mesmo procedimento não é realizado pelo equipamento nas configurações em que a chave 11 é igual a 0 ou 1 e a chave 12 é igual a 0 (figura 8.1), fazendo com que apenas o chiller de compressão trabalhe para abaixar a temperatura do termoacumulador e assim aumentando o custo de consumo devido à compra de energia da rede de distribuição.

A configuração ótima mostrada na figura 8.2 proporciona o uso mais racional do sistema de cogeração para esta otimização de chaves neste caso. O custo de consumo do sistema convencional (R\$ 8.230,00) chega a ser 3,47 vezes maior que o custo de consumo do sistema de cogeração (R\$ 2.370,00). Embora o investimento inicial seja muito alto (R\$ 207.650,00), a economia obtida com o consumo aponta o sistema de cogeração, neste caso, como melhor que o sistema convencional. Neste caso, vale a pena realizar o empreendimento com os seus riscos envolvidos, pois a economia proporcionada pelo sistema de cogeração é de 25,1 % em relação ao sistema convencional em termos de valor presente. Os resultados financeiros obtidos com o sistema de cogeração são apresentados na figura 8.4.

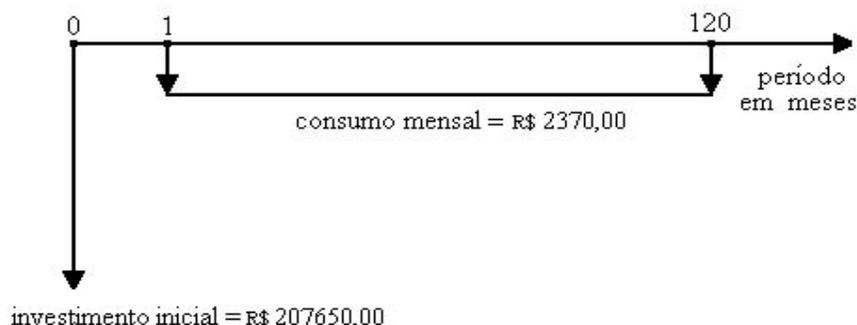


Figura 8.4: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1.1 (chave 11 = 1 e chave 12 = 1).

8.1.2 Segunda variação de potência (máquina térmica 1 igual a 30 kW e máquina térmica 2 igual a 30 kW).

Nesta seção os dados utilizados são iguais ao do caso base, inclusive os relativos às duas máquinas térmicas (um grupo gerador de 30 kW e uma microturbina de 30 kW).

Os resultados são apresentados na tabela 8.3, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.3: VPLs do caso estudado (caso 1.2)

CHAVES					Caso 1.1 (VPL convencional = 420.920,00)		
2	3	8	11	12	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	0	0	1	1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	493.680,00	191.390,00	76%
0	0	1	1	0	493.680,00	191.390,00	76%
0	0	1	0	1	518.010,00	215.720,00	99%
0	0	1	0	0	493.680,00	191.390,00	76%
0	1	0	1	1	442.940,00	140.650,00	29%
0	1	0	1	0	441.720,00	139.430,00	28%
0	1	0	0	1	446.780,00	144.490,00	33%
0	1	0	0	0	441.720,00	139.430,00	28%
0	1	1	1	1	415.820,00	113.530,00	4%
0	1	1	1	0	410.960,00	108.670,00	0%
0	1	1	0	1	449.600,00	147.310,00	36%
0	1	1	0	0	410.960,00	108.670,00	0%
1	0	0	1	1	462.780,00	160.490,00	48%
1	0	0	1	0	461.070,00	158.780,00	46%
1	0	0	0	1	469.070,00	166.780,00	53%
1	0	0	0	0	461.070,00	158.780,00	46%
1	0	1	1	1	437.690,00	135.400,00	25%
1	0	1	1	0	435.020,00	132.730,00	22%
1	0	1	0	1	463.460,00	161.170,00	48%
1	0	1	0	0	435.020,00	132.730,00	22%
1	1	0	1	1	462.780,00	160.490,00	48%
1	1	0	1	0	461.070,00	158.780,00	46%
1	1	0	0	1	469.070,00	166.780,00	53%
1	1	0	0	0	461.070,00	158.780,00	46%
1	1	1	1	1	437.690,00	135.400,00	25%
1	1	1	1	0	435.020,00	132.730,00	22%
1	1	1	0	1	463.460,00	161.170,00	48%
1	1	1	0	0	435.020,00	132.730,00	22%

No caso base a microturbina está configurada para ligar apenas quando a temperatura do termoacumulador estiver acima de 9 °C (chave 3 = 1) e o grupo gerador está configurado para ligar quando ocorrer o horário de ponta (chave 8 = 1). Toda combinação em que a chave 2 for igual a 0 (microturbina não liga se houver demanda elétrica), a chave 3 for igual a 0 (microturbina não liga se a temperatura do termoacumulador for maior que 9 °C) e a chave 8 também for igual a 0 (grupo gerador não liga se estiver no horário de ponta) nenhuma das máquinas térmicas é ligada fazendo com que o chiller de absorção não funcione e assim o sistema não consegue suprir a demanda térmica.

A tabela 8.3 será dividida em grupos de configurações onde cada um será apresentado entre parênteses, de forma que o primeiro número corresponde à chave 2, o segundo à chave 3, o terceiro à chave 8, o quarto à chave 11 e o quinto à chave 12.

Grupo 1 [(0 1 0 1 0), (0 1 0 0 0)]: A microturbina liga quando a temperatura do termoacumulador está acima de 9 °C, mas sempre que liga, opera com a potência máxima (chave 5 = 0 e chave 6 = 1). As duas configurações das chaves 11 e 12 possuem a mesma resposta (ou a potência máxima do equipamento, ou a própria carga elétrica, ou a potência igual a zero).

Grupo 2 [(1 0 0 1 1), (1 1 0 1 1)]: A microturbina liga quando ocorre demanda elétrica e quando a temperatura do termoacumulador é maior que 9 °C para a segunda configuração e liga apenas quando ocorre demanda elétrica para a primeira configuração. Como o chiller de compressão também liga quando a temperatura do termoacumulador é maior que 9 °C (desliga apenas quando ocorre horário de ponta), então sempre haverá demanda elétrica quando o termoacumulador se encontrar nesta condição de temperatura e ainda a microturbina, quando ligada, trabalha com a potência máxima. Com isto as chaves 2 e 3 acabam comandando a microturbina a trabalhar da mesma forma.

Grupo 3 [(1 0 0 1 0), (1 0 0 0 0), (1 1 0 1 0), (1 1 0 0 0)]: Acontece com a microturbina o mesmo que ocorre no grupo 2 e as configurações das chaves 11 e 12 fazem com que o grupo gerador trabalhe sempre da mesma forma (ou a potência máxima do equipamento, ou a própria carga elétrica, ou zero).

Grupo 4 [(1 0 0 0 1), (1 1 0 0 1)]: Acontece com a microturbina o mesmo que ocorre com os grupos 2 e 3. As configurações das chaves 11 e 12 fazem com que o grupo gerador trabalhe sempre com a potência máxima.

Grupo 5 [(0 1 1 1 0), (0 1 1 0 0)]: Ocorre a mesma situação do grupo 1, porém, nestas circunstâncias, o grupo gerador também liga quando existe demanda (demanda elétrica total menos a potência gerada pela microturbina).

Grupo 6 [(1 0 1 0 1), (1 1 1 0 1)]: Ocorre a mesma situação do grupo 4, porém, nestas circunstâncias, o grupo gerador também liga quando existe demanda (demanda elétrica total menos a potência gerada pela microturbina).

Grupo 7 [(1 0 1 1 1), (1 1 1 1 1)]: Ocorre a mesma situação do grupo 2, porém, nestas circunstâncias, o grupo gerador também liga quando existe demanda (demanda elétrica total menos a potência gerada pela microturbina).

Grupo 8 [(1 0 1 1 0), (1 0 1 0 0), (1 1 1 1 0), (1 1 1 0 0)]: Ocorre a mesma situação do grupo 3, porém, nestas circunstâncias, o grupo gerador também liga quando existe demanda (demanda elétrica total menos a potência gerada pela microturbina).

Grupo 9 [(0 0 1 1 0), (0 0 1 0 0), (0 0 1 1 1)]: Neste grupo a microturbina sempre fica desligada. As duas primeiras configurações de chaves ((0 0 1 1 0) e (0 0 1 0 0)) liga o grupo gerador de acordo com a relação entre a potência deste e a demanda elétrica a ser suprida, fazendo com que o equipamento funcione ora com a potência igual a zero, ora igual a própria carga elétrica e ora igual à potência máxima. A terceira configuração de chaves ((0 0 1 1 1)) faz com que o equipamento funcione ora com a potência igual a mínima, ora igual a própria carga elétrica e ora igual à potência máxima. As duas primeiras configurações de chaves têm resultado igual à terceira porque, como só o grupo gerador está operando, não ocorreram momentos em que a demanda elétrica a ser gerada foi menor que a potência mínima do equipamento, fazendo-o funcionar ou com a potência máxima, ou com a potência igual à própria demanda elétrica no decorrer de todo o período.

Configuração (0 0 1 0 1): Ocorre a mesma situação do grupo 9, porém o grupo gerador está configurado para ligar sempre com a potência máxima.

Configuração (0 1 0 1 1): Ocorre a mesma situação do grupo 1, porém o grupo gerador funciona ou com a potência igual à máxima, ou igual à própria carga elétrica, ou igual à potência mínima do equipamento.

Configuração (0 1 0 0 1): Ocorre a mesma situação do grupo 1, porém o grupo gerador liga sempre com a potência máxima.

Configuração (0 1 1 1 1): Ocorre a mesma situação do grupo 5, porém o grupo gerador funciona ou com a potência igual à máxima, ou igual à própria carga elétrica, ou igual à potência mínima do equipamento.

Configuração (0 1 1 0 1): Ocorre a mesma situação do grupo 5, porém o grupo gerador liga sempre com a potência máxima.

A configuração ótima ocorreu quando as chaves 2, 3, 8, 11 e 12 estavam nas posições (0 1 1 1 0) e (0 1 1 0 0). Verifica-se nas figuras 8.5 e 8.6 que a microturbina liga apenas de acordo com a temperatura do termoacumulador (chave 1 igual a 0, chave 2 igual a 0 e chave 3 igual a 1) e quando está ligada gera sempre o máximo (chave 5 igual a 0 e chave 6 igual a 1). O grupo gerador liga quando ocorre o horário de ponta e quando existe demanda elétrica (chave 7 igual a 1, chave 8 igual a 1 e chave 9 igual a 0). Como a demanda elétrica percebida pelo grupo gerador é igual à demanda total menos a potência gerada pela microturbina, será gerado, então, ora a potência mínima, ora a própria carga térmica e ora a potência máxima (chave 11 igual a 1 e chave 12 igual a 0).

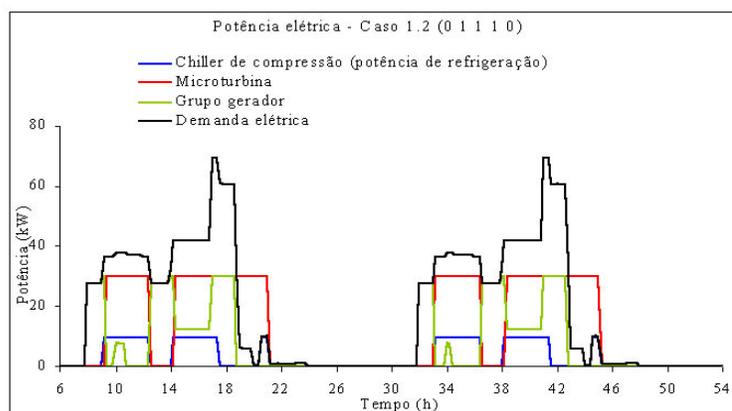


Figura 8.5: Potência elétrica no caso 1.2 [(0 1 1 1 0) ou (0 1 1 0 0)].

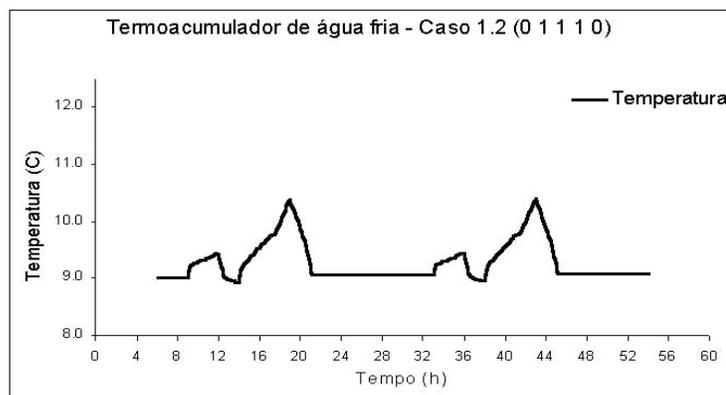


Figura 8.6: Temperatura do termoacumulador no caso 1.2 [(0 1 1 1 0) ou (0 1 1 0 0)].

Esta configuração ótima proporciona o uso mais racional do sistema de cogeração para esta otimização de chaves. O custo de consumo do sistema convencional (R\$ 8.230,00) chega

a ser 3,43 vezes maior que o custo de consumo do sistema de cogeração (R\$ 2.400,00). Embora o investimento inicial seja muito alto (R\$ 302.290,00), a economia obtida com o consumo aponta o sistema de cogeração, neste caso, como melhor que o sistema convencional. Contudo é preciso avaliar o risco do investimento, pois a economia proporcionada pelo sistema de cogeração é de apenas 2,4 % em relação ao sistema convencional em termos de valor presente. Os resultados financeiros obtidos com o sistema de cogeração são apresentados na figura 8.7.

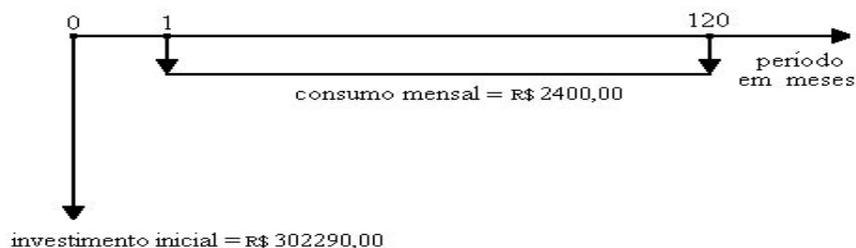


Figura 8.7: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1.2 [(0 1 1 1 0) ou (0 1 1 0 0)].

8.1.3 Terceira variação de potência (máquina térmica 1 igual a 60 kW e máquina térmica 2 igual a 0 kW)

Os dados utilizados no estudo de caso desta seção são os mesmos utilizados no caso base, porém o sistema de cogeração possui apenas uma máquina térmica, que é uma microturbina de 60 kW.

Os resultados são apresentados na tabela 8.4, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.4: VPLs do caso estudado (caso 1.3)

CHAVES					Caso 1.1 (VPL convencional = 420.920,00)		
2	3	8	11	12	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	0	0	1	1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	0	1	0	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	0	0	1	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	0	0	0	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	1	1	1	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	1	1	0	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	1	0	1	560.550,00	163.630,00	0%
0	1	1	0	0	560.550,00	163.630,00	0%
1	0	0	1	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	0	1	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	0	0	1	616.220,00	219.300,00	34%

Tabela 8.4: continuação

1	0	0	0	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	1	1	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	1	1	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	1	0	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	0	1	0	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	0	1	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	0	1	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	0	0	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	0	0	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	1	1	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	1	1	0	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	1	0	1	616.220,00	219.300,00	34%
1	1	1	0	0	616.220,00	219.300,00	34%

As chaves 8, 11 e 12 não exercem nenhuma influência sobre o sistema, pois elas controlam a máquina térmica dois (o grupo gerador) que neste caso não existe. Todas as vezes que as chaves 2 e 3 permaneceram na posição 0, a microturbina não entrou em operação, pois, de acordo com o caso base, a chave 1 (liga no horário de ponta) também está na posição 0. Desta forma o chiller de compressão e o de absorção (que não entra em operação devido a não existência de gases de exaustão), não conseguem suprir a demanda térmica. Com isto, as opções viáveis são aquelas em que ou a chave 2 (liga quando ocorre demanda elétrica), ou a chave 3 (liga de acordo com a temperatura do termoacumulador), ou as duas chaves estejam na posição 1.

A posição da chave 5 (módula ou não a demanda térmica) e da chave 6 (permite ou não o equipamento gerar em excesso) não são alteradas em relação ao caso base e estão posicionadas em 0 e 1, respectivamente. Isto faz com que, sempre que a microturbina for ligada, ela deverá gerar a potência máxima (tabela 4.3 – tabela de decisões da tabela verdade). Diante desta situação podem ocorrer apenas duas situações:

Na primeira, se a chave 2 estiver na posição 1, a microturbina será ligada sempre que ocorrer demanda a ser suprida independente desta ser menor que a potência mínima para o equipamento ser ligado e este funcionará com a sua potência máxima. A chave 3 (liga o equipamento de acordo com a temperatura do termoacumulador) não fará diferença em estar na posição 1 ou não, pois o chiller de compressão gera uma demanda elétrica e liga sempre de acordo com a temperatura do termoacumulador fazendo com que a chave 3 fique redundante com a função da chave 2. A resposta obtida é apresentada na figura 8.8.

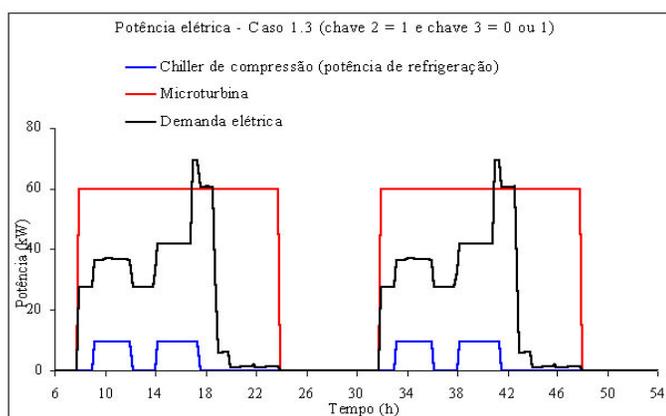


Figura 8.8: Potência elétrica no caso 1.3 (chave 2 = 1 e chave 3 = 0 ou 1).

Na segunda situação, a chave 2 está na posição 0 e a chave 3 está na posição 1, fazendo com que a microturbina ligue apenas de acordo com a temperatura do termoacumulador, negligenciando a demanda elétrica. A resposta obtida é apresentada na figura 8.9.

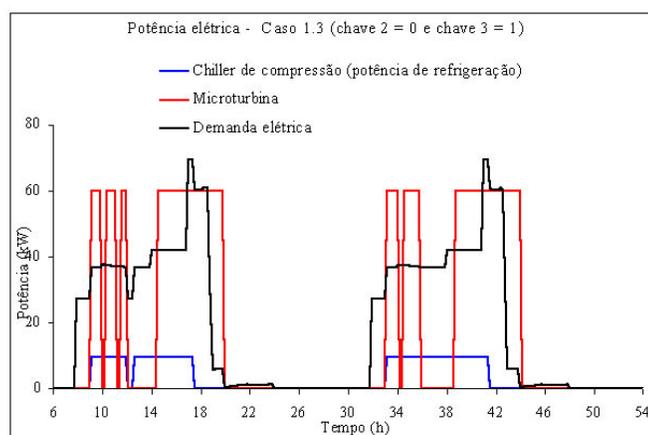


Figura 8.9: Potência elétrica no caso 1.3 (chave 2 = 0 e chave 3 = 1).

A utilização da microturbina apenas de acordo com a temperatura do termoacumulador (chave 2 = 0 e chave 3 = 1) constitui a melhor opção de utilização do sistema de cogeração, para este caso. No entanto o sistema convencional é a opção ótima para esta seção. A utilização do sistema de cogeração, mesmo na sua melhor configuração, significa um prejuízo de 33,2 % em relação ao sistema convencional.

A má resposta do sistema de cogeração ocorre devido a um acréscimo de 31,3 % nos custos de investimento e de 50,4 % nos custos de consumo em relação ao caso estudado na seção 8.1.2. Os resultados financeiros estão apresentados na figura 8.10.



Figura 8.10: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1.3 (chave 2 = 0 e chave 3 = 1).

8.1.4 Quarta variação de potência (máquina térmica 1 igual a 0 kW e máquina térmica 2 igual a 90 kW)

Os dados utilizados no estudo de caso desta seção são os mesmos utilizados no caso base, porém o sistema de cogeração possui apenas uma máquina térmica (grupo gerador) de 90 kW.

Os resultados são apresentados na tabela 8.5, onde os itens “VPLconvencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.5: VPLs do caso estudado (caso 1.4)

CHAVES					Caso 1.1 (VPL convencional = 420.920,00)		
2	3	8	11	12	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	0	0	1	1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	419.890,00	173.990,00	70%
0	0	0	0	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	347.990,00	102.090,00	0%
0	0	1	1	0	360.010,00	114.110,00	12%
0	0	1	0	1	480.770,00	234.870,00	130%
0	0	1	0	0	360.010,00	114.110,00	12%
0	1	0	1	1	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	419.890,00	173.990,00	70%
0	1	0	0	0	-1	-1	-1
0	1	1	1	1	347.990,00	102.090,00	0%
0	1	1	1	0	360.010,00	114.110,00	12%
0	1	1	0	1	480.770,00	234.870,00	130%
0	1	1	0	0	360.010,00	114.110,00	12%
1	0	0	1	1	-1	-1	-1
1	0	0	1	0	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	419.890,00	173.990,00	70%
1	0	0	0	0	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	347.990,00	102.090,00	0%
1	0	1	1	0	360.010,00	114.110,00	12%
1	0	1	0	1	480.770,00	234.870,00	130%
1	0	1	0	0	360.010,00	114.110,00	12%
1	1	0	1	1	-1	-1	-1
1	1	0	1	0	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	419.890,00	173.990,00	70%
1	1	0	0	0	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	347.990,00	102.090,00	0%
1	1	1	1	0	360.010,00	114.110,00	12%
1	1	1	0	1	480.770,00	234.870,00	130%
1	1	1	0	0	360.010,00	114.110,00	12%

As chaves 2 e 3 não exercem nenhuma influência sobre o sistema, pois elas controlam a máquina térmica 1 (microturbina), que neste caso não existe. Todas as vezes que a chave 8 permaneceu na posição 0 (exceto para chave 11 = 1 e chave 12 = 0), o grupo gerador entrou em funcionamento na mesma situação do caso base (liga apenas quando ocorrer o horário de ponta), porém não ligou sempre com a potência máxima, fazendo com que o chiller de compressão e o de absorção (com baixa oferta de gases de exaustão), não conseguissem suprir a demanda térmica. Quando a chave 11 foi igual a 1 e a chave 12 igual a 0, o grupo gerador trabalhou com a potência máxima toda vez que ligado (no horário de ponta), fazendo com que o sistema suprisse a demanda térmica. Este fato pode ser visualizado na figura 8.11.

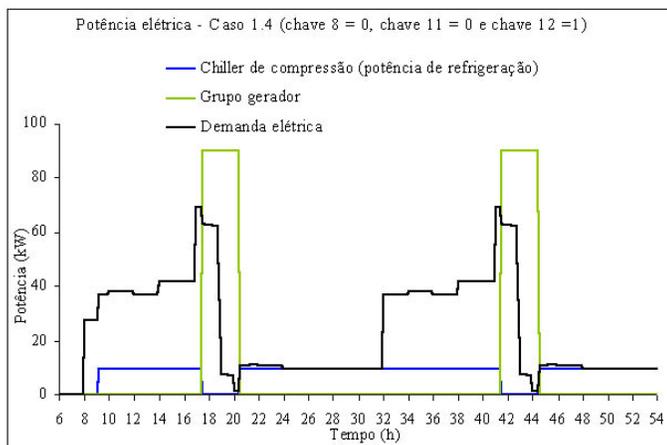


Figura 8.11: Potência elétrica no caso 1.4 (chave 8 = 0, chave 11 = 0 e chave 12 = 1).

Com isto, o restante das opções viáveis são aquelas em que a chave 8 está na posição 1 (liga quando houver demanda de energia elétrica). Diante desta situação existem apenas quatro combinações possíveis entre as chaves 11 e 12: Chave 11 igual a 1 e a chave 12 igual a 1 (modula a carga e pode gerar em excesso), chave 11 igual a 1 e a chave 12 igual a 0 (modula a carga e não pode gerar em excesso), chave 11 igual a 0 e a chave 12 igual a 1 (gera o máximo possível e pode gerar em excesso) e chave 11 igual a 0 e a chave 12 igual a 0 (gera o máximo possível e não pode gerar em excesso). As respostas do sistema ao longo do período podem ser 0, a potência mínima do equipamento, a carga térmica e a potência máxima do equipamento de acordo com a combinação que pode ser realizada entre a posição das chaves 11 e 12 e a carga a ser gerada (se a carga é menor que a mínima potência que pode ser gerada pela máquina térmica, se a carga está entre o mínimo e o máximo que a máquina térmica pode gerar e se a carga é maior que o máximo que a máquina térmica pode gerar). Existem 9 respostas possíveis que podem ser visualizadas na tabela de decisões da tabela verdade (Tabela 4.3) apresentada no capítulo 4.

Observando a tabela de decisões da tabela verdade (Tabela 4.3) percebe-se que as combinações chave 11 igual a 1 com a chave 12 igual a 0 e chave 11 igual a 0 com a chave 12 igual a 0 possuem o mesmo resultado independente da posição da carga em relação à potência do grupo gerador. O resultado obtido é apresentado na figura 8.12 e pode-se verificar que quando a carga é menor que a potência mínima do equipamento, ele permanece desligado.

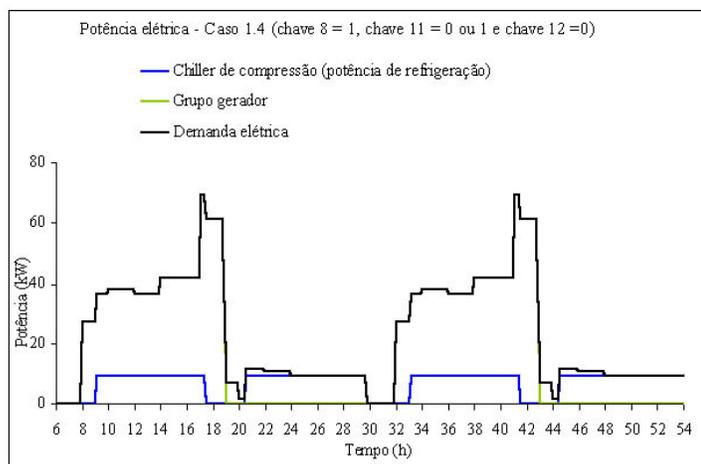


Figura 8.12: Potência elétrica no caso 1.4 (chave 11 = 0 ou 1 e chave 12 = 0).

Observando a figura 8.13, verifica-se que, como as chave 11 está na posição 1 e a chave 12 está na posição 1, o equipamento gera a própria demanda elétrica se a potência for igual ou inferior à demanda e se esta for menor que a potência mínima que o equipamento pode gerar, ele então gera a própria potência mínima.

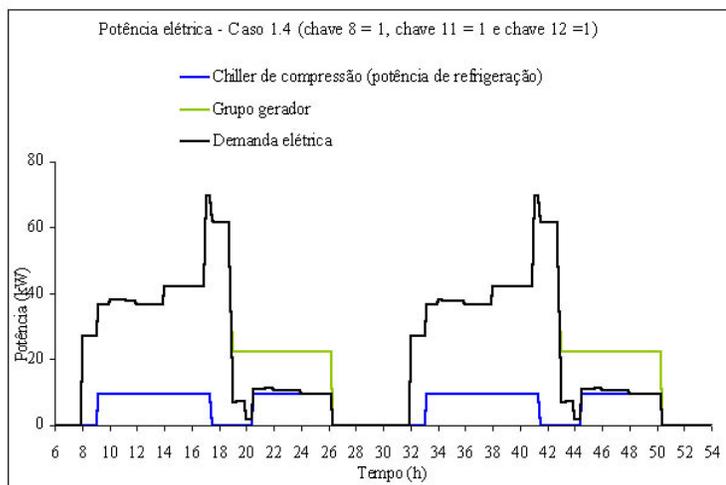


Figura 8.13: Potência elétrica no caso 1.4 (chave 11 = 1 e chave 12 = 1).

Na figura 8.14 é apresentada a potência elétrica quando a chave 11 é igual a 0 e a chave 12 é igual a 1. Com as chaves 11 e 12 nesta posição o grupo gerador funcionará com sua potência máxima sempre que for ligado.

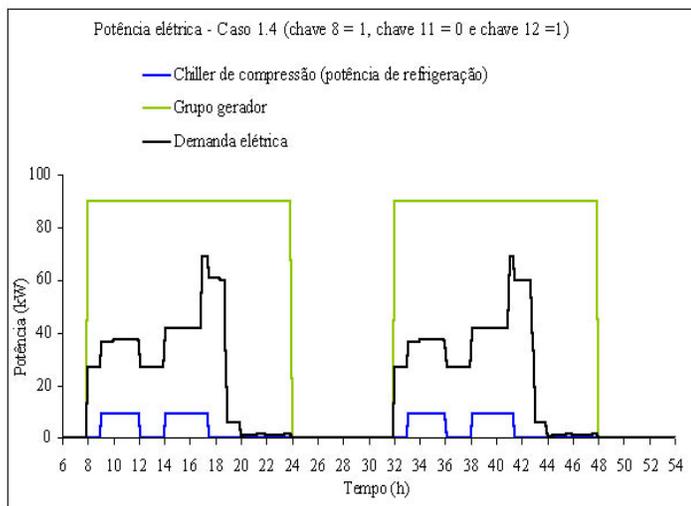


Figura 8.14: Potência elétrica no caso 1.4 (chave 11 = 0 e chave 12 = 1).

A situação mostrada na figura 8.14 (chave 11 = 0 e chave 12 = 1) é a pior devido ao grupo gerador, quando ligado, funcionar com a sua potência máxima, consumindo uma quantia expressiva de combustível. Isto faz com que o seu VPL de consumo seja 48,9 % do VPL total. A situação mostrada na figura 8.13 (chave 11 = 1 e chave 12 = 1) é a melhor opção, onde o grupo gerador é ligado com a potência mínima numa hora necessária, quando ocorre uma demanda de energia elétrica provocada pelo chiller de compressão (14 kW), fazendo com que o chiller de absorção também funcione ajudando a abaixar a temperatura do termoacumulador. Este mesmo procedimento não é realizado pelo equipamento quando a configuração está com a chave 11 igual a 0 ou 1 e a chave 12 é igual a 0 (figura 8.12), fazendo com que apenas o chiller de compressão trabalhe para abaixar a temperatura do

termoacumulador e assim aumentando o custo de consumo devido à compra de energia da rede de distribuição.

A configuração ótima mostrada na figura 8.13 proporciona o uso mais racional do sistema de cogeração para esta otimização de chaves. O custo de consumo do sistema convencional (R\$ 8.230,00) chega a ser 3,27 vezes maior que o custo de consumo do sistema de cogeração (R\$ 2.520,00). Embora o investimento inicial seja muito alto (R\$ 245.900,00), a economia obtida com o consumo acusa o sistema de cogeração, neste caso, de ser melhor que o sistema convencional. Diante disto, vale a pena realizar o empreendimento com os seus riscos envolvidos, pois a economia proporcionada pelo sistema de cogeração é de 17,3 % em relação ao sistema convencional em termos de valor presente. Os resultados financeiros obtidos com o sistema de cogeração são apresentados na figura 8.15.

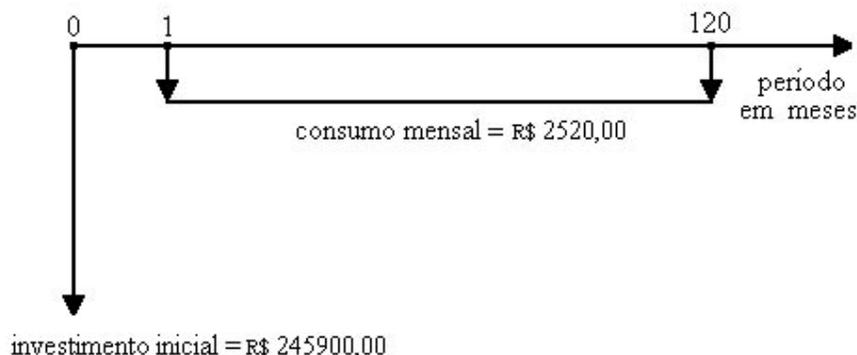


Figura 8.15: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1.4 (chave 11=1 e chave 12=1).

8.1.5 Quinta variação de potência (máquina térmica 1 igual a 90 kW e máquina térmica 2 igual a 0 kW)

Os dados utilizados no estudo de caso desta seção são os mesmos utilizados no caso base, porém o sistema de cogeração possui apenas uma máquinas térmica, que é uma um grupo gerador de 90 kW.

Os resultados são apresentados na tabela 8.6, onde os itens “VPL convencional”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.6: VPLs do caso estudado (caso 1.5)

CHAVES					Caso 1.1 (VPL convencional = 420.920,00)		
2	3	8	11	12	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	0	0	1	1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	0	1	0	743.410,00	213.600,00	0%

Tabela 8.6: continuação

0	1	0	0	1	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	0	0	0	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	1	1	1	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	1	1	0	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	1	0	1	743.410,00	213.600,00	0%
0	1	1	0	0	743.410,00	213.600,00	0%
1	0	0	1	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	0	1	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	0	0	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	0	0	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	1	1	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	1	1	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	1	0	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	0	1	0	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	0	1	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	0	1	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	0	0	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	0	0	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	1	1	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	1	1	0	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	1	0	1	843.010,00	313.200,00	47%
1	1	1	0	0	843.010,00	313.200,00	47%

As chaves 8, 11 e 12 não exercem nenhuma influência sobre o sistema, pois elas controlam a máquina térmica 2 (o grupo gerador), que neste caso não existe. Todas as vezes que as chaves 2 e 3 permaneceram na posição 0, a microturbina não entrou em operação, pois, de acordo com o caso base, a chave 1 (liga no horário de ponta) também está na posição 0, fazendo com que o chiller de compressão e o de absorção (que não entra em operação devido a não existência de gases de exaustão), não consiga suprir a demanda térmica. Com isto, as opções viáveis são aquelas em que, ou a chave 2 (liga quando ocorre demanda elétrica), ou a chave 3 (liga de acordo com a temperatura do termoacumulador), ou as duas chaves estejam na posição 1.

A posição da chave 5 (modula ou não a demanda térmica) e da chave 6 (permite ou não ao equipamento gerar em excesso) não são alteradas em relação ao caso base e estão posicionadas em 0 e 1, respectivamente. Isto faz com que, sempre que o equipamento for ligado, ele deverá gerar a potência máxima (tabela 4.3 – tabela de decisões da tabela verdade). Diante desta situação podem ocorrer apenas duas situações:

Na primeira, se a chave 2 estiver na posição 1, a microturbina será ligada sempre que ocorrer demanda a ser suprida independente desta ser menor que a potência mínima para o equipamento ser ligado e este gerará a sua potência máxima. A chave 3 (liga o equipamento de acordo com a temperatura do termoacumulador) não fará diferença em estar na posição 1 ou não, pois o chiller de compressão gera uma demanda elétrica e liga sempre de acordo com a temperatura do termoacumulador fazendo com que a chave 3 fique redundante. A resposta obtida é apresentada na figura 8.16.

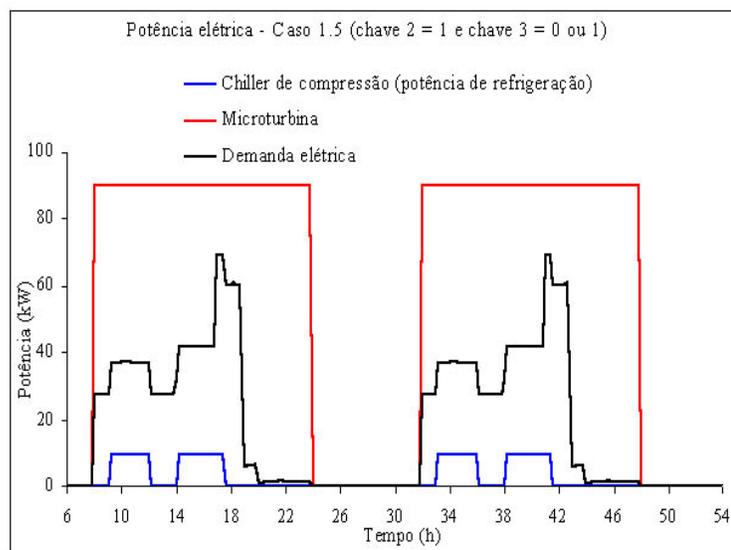


Figura 8.16: Potência elétrica no caso 1.5 (chave 2 = 1 e chave 3 = 0 ou 1).

Na segunda situação, a chave 2 está na posição 0 e a chave 3 está na posição 1, fazendo com que a microturbina ligue apenas de acordo com a temperatura do termoacumulador, não se importando com a demanda elétrica. A resposta obtida é apresentada na figura 8.17.

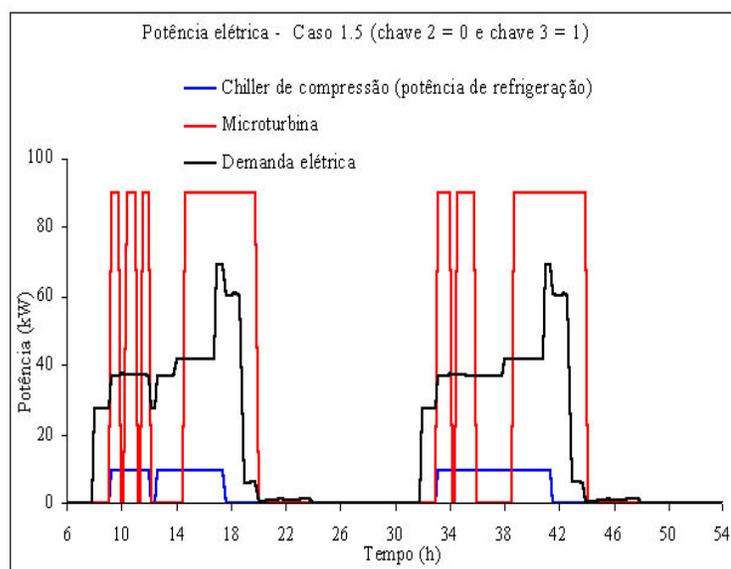


Figura 8.17: Potência elétrica no caso 1.5 (chave 2 = 1 e chave 3 = 0 ou 1).

A utilização da microturbina apenas de acordo com a temperatura do termoacumulador (chave 2 = 0 e chave 3 = 1) constitui a melhor opção de utilização do sistema de cogeração, para este caso. No entanto o sistema convencional é a opção ótima para esta seção. A utilização do sistema de cogeração, mesmo na sua melhor configuração, significa um prejuízo de 76,6 % em relação ao sistema convencional.

A má resposta do sistema de cogeração ocorre devido a um acréscimo de 75,3 % nos custos de investimento e de 96,3 % nos custos de consumo em relação ao caso estudado na seção 8.1.2. Os resultados financeiros estão apresentados na figura 8.18.

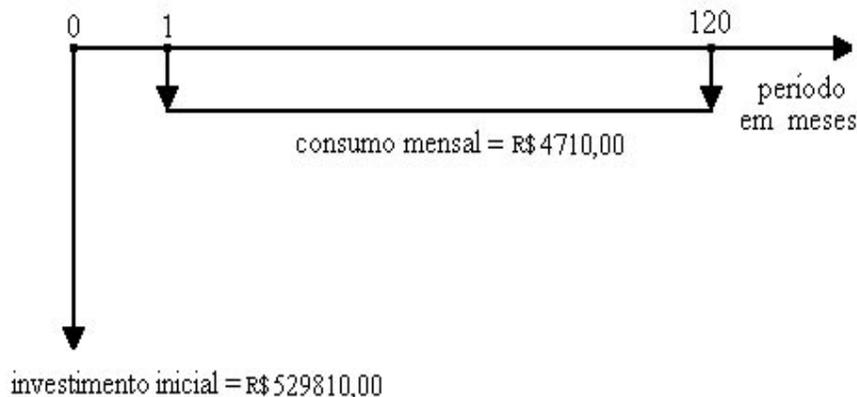


Figura 8.18: Fluxo de caixa do sistema de cogeração no caso 1.5 (chave 2 = 0 e chave 3 = 1).

O caso estudado nesta presente seção é também uma escolha de investimento pior que a apresentada na seção 8.1.3, onde existe apenas uma microturbina de 60 kW. Ocorre um acréscimo de 33,4 % nos custos de investimento e de 30,5 % nos custos de consumo em relação à seção 8.1.3.

O VPL ótimo encontrado, dentre todos os casos estudados, foi o realizado na seção 8.1.1, onde era utilizado apenas um grupo gerador com potência nominal máxima de 60 kW. A configuração ótima deste caso foi independente das chaves 2 e 3, pois não existe a máquina térmica 1 e a sua escolha representa uma economia de 25,1 % sobre o sistema convencional, 23,3 % sobre a escolha do VPL ótimo da seção 8.1.2, 43,8 % sobre a escolha do VPL ótimo da seção 8.1.3, 9,5 % sobre a escolha do VPL ótimo da seção 8.1.4 e 57,6 % sobre a escolha do VPL ótimo da seção 8.1.5. Este resultado final servirá como base para estudos realizados na seção seguinte.

O resumo das configurações ótimas das chaves é apresentado na tabela 8.7 e nela é possível verificar que as seções 8.1.1 e 8.1.4 mantiveram as mesmas configurações como ótimas e da mesma forma ocorreu com as seções 8.1.3 e 8.1.5. Para este estudo a escolha de qual ou quais máquinas térmicas usar no sistema de cogeração foi determinante na obtenção das configurações ótimas, porém a determinação de suas potências não conseguiram alterar as configurações ótimas determinadas pelas escolhas das máquinas térmicas.

Tabela 8.7: Resumo final das posições ótimas das chaves

Seção	Posições ótimas das chaves
8.1.1	(0 0 1 1 1), (0 1 1 1 1), (1 0 1 1 1), (1 1 1 1 1)
8.1.2	(0 1 1 1 0), (0 1 1 0 0)
8.1.3	(0 1 0 1 1), (0 1 0 1 0), (0 1 0 0 1), (0 1 0 0 0), (0 1 1 1 1), (0 1 1 1 0), (0 1 1 0 1), (0 1 1 0 0)
8.1.4	(0 0 1 1 1), (0 1 1 1 1), (1 0 1 1 1), (1 1 1 1 1)
8.1.5	0 1 0 1 1), (0 1 0 1 0), (0 1 0 0 1), (0 1 0 0 0), (0 1 1 1 1), (0 1 1 1 0), (0 1 1 0 1), (0 1 1 0 0)

8.1.6 Discussões finais

O preço das duas máquinas térmicas foi o principal fator que proporcionou à configuração das máquinas térmicas da seção 8.1.1 (grupo gerador de 60 kW com VPL ótimo igual a R\$ 315100,00) ser melhor que a da seção 8.1.2 (microturbina de 30 kW e grupo

gerador de 30 kW com VPL ótimo igual a R\$ 410.960,00). Os preços dos equipamentos utilizados neste estudo foram os mesmos daqueles na aquisição pelo projeto COGENCASA. Pode-se notar que o preço da turbina (1.302,8 US\$/kW – tabela 6.7) está muito elevado devido à baixa produção destes equipamentos no mercado. A produção da microturbina em larga escala é um fato de ocorrência provável nos próximos anos, o que pode provocar uma grande redução no preço deste equipamento. O preço do grupo gerador adquirido está baixo, além de ser produzido em larga escala, existem vários artificios que a microturbina oferece e o grupo gerador não (no caso do grupo gerador adquirido pelo projeto COGENCASA). Como exemplo, a microturbina pode entrar em sincronismo com a rede de distribuição de energia automaticamente, para realizar a venda de energia.

Na tabela 8.8 são apresentados três possíveis cenários para a redução do preço da microturbina nos próximos anos e do valor real que o grupo gerador pode atingir. Nesta tabela são apresentados o VPL de consumo, o VPL de investimento, o VPL total, os preços das máquinas térmicas e suas potências. O preço da microturbina foi calculado de forma a igualar o VPL total da configuração ótima usando a microturbina (30 kW) e o grupo gerador (30 kW) ao VPL total da configuração ótima usando apenas o grupo gerador (60 kW). Desta forma a redução abrangerá a diferença do custo de investimento entre os dois casos (R\$ 94.640,00 para o primeiro cenário, R\$ 83.100,00 para o segundo cenário e R\$ 62.710,00 para o terceiro cenário) somado à diferença do custo de consumo entre os dois casos (R\$ 1.220,00 para todos os cenários).

Tabela 8.8: Exemplo de cenários possíveis para a redução do preço da microturbina.

	grupo gerador (US\$/kW)	microturbina (US\$/kW)	VPL consumo (R\$)	VPL invest. (R\$)	VPL total (R\$)
Situação atual (m = 60 e t = 0)	375,00	1.302,80	107.450,00	207.650,00	315.100,00
Situação atual (m = 30 e t = 30)	375,00	1.302,80	108.670,00	302.290,00	410.960,00
Cenário 1 (m = 60 e t = 0)	375,00	363,00	107.450,00	207.650,00	315.100,00
Cenário 1 (m = 30 e t = 30)	375,00	363,00	108.670,00	206.430,00	315.100,00
Cenário 2 (m = 60 e t = 0)	500,00	488,00	107.450,00	233.150,00	340.600,00
Cenário 2 (m = 30 e t = 30)	500,00	488,00	108.670,00	231.930,00	340.600,00
Cenário 3 (m = 60 e t = 0)	700,00	688,00	107.450,00	273.950,00	381.400,00
Cenário 3 (m = 30 e t = 30)	700,00	688,00	108.670,00	272.730,00	381.400,00

Legenda: m (potência do grupo gerador em kW), t (potência da microturbina em kW)

O cálculo da redução de preço da microturbina pode ser realizado pelas equações 8.1, 8.2, 8.3 e 8.4.

$$P_{\text{ATUAL}} = 1302,8 \text{ (US$/kW)} * \text{Pot} * \text{RD} \quad (8.1)$$

$$\text{DIF}_{\text{CONS}} = \text{VPL}_{\text{CONS}(30)} - \text{VPL}_{\text{CONS}(60)} \quad (8.2)$$

$$\text{DIF}_{\text{INV}} = \text{VPL}_{\text{INV}(30)} - \text{VPL}_{\text{INVS}(60)} \quad (8.3)$$

$$P_{\text{RESULT}} = (P_{\text{ATUAL}} - \text{DIF}_{\text{CONS}} - \text{DIF}_{\text{INV}}) / (\text{Pot} * \text{RD}) \quad (8.4)$$

Onde,

DIF_{CONS} – diferença do VPL de consumo entre os dois casos (R\$);

DIF_{INV} – diferença do VPL de investimento entre os dois casos (R\$);

P_{ATUAL} – preço atual da microturbina (R\$);

P_{RESULT} – preço reduzido de cada cenário (R\$);

Pot – potência da máquina térmica (kW);

RD – taxa de conversão real-dolar (R\$/US\$);

$VPL_{CONS(30)}$ – VPL de consumo do caso utilizando uma microturbina (30 kW) e um grupo gerador (30 kW)

$VPL_{CONS(60)}$ – VPL de consumo do caso utilizando apenas grupo gerador (60 kW);

$VPL_{INV(30)}$ – VPL de investimento do caso utilizando uma microturbina (30 kW) e um grupo gerador (30 kW);

$VPL_{INVS(60)}$ – VPL de investimento do caso utilizando apenas grupo gerador (60 kW);

A microturbina produz mais gases de exaustão que o grupo gerador, isto deveria fazer com que a configuração ótima do caso 1.2 obtivesse um consumo menor que a configuração ótima do caso 1.1 devido o maior aproveitamento do chiller de absorção. Como pode ser visto, esta situação não ocorre e o VPL de consumo do caso 1.1 é R\$ 1.220,00 inferior ao do caso 1.2. Vários fatores como eficiência elétrica da máquina térmica, eficiência térmica, temperatura de saída dos gases de exaustão, eficiência da caldeira de recuperação entre outros podem estar fazendo com que a microturbina não usufrua a vantagem que tem em relação ao grupo gerador. Observando os dados de entrada dos equipamentos (tabela 6.1 – Capítulo 6) é possível verificar que a eficiência da caldeira da máquina térmica 1 é igual a 0,6 e a da máquina térmica 2 é igual a 0,7. Como os dados de entrada foram baseados no projeto COGENCASA, são diferentes devido ao projeto possuir dois trocadores de calor distintos. Quando a eficiência da caldeira da máquina térmica 1 é igualada à da máquina térmica 2 o consumo do caso 1.2 reduz de R\$ 2.400,00 por mês para R\$ 2.290,00, fazendo com que este novo VPL de consumo do caso 1.2 (R\$ 103.970,00) passe a ser menor que o VPL de consumo do caso 1.1 (R\$ 107.450,00). Da mesma forma pode ser avaliada a eficiência elétrica da máquina térmica 1 (0,3) e da máquina térmica 2 (0,4). Quando a eficiência elétrica da máquina térmica 2 é igualada à da máquina térmica 1 o consumo do caso 1.1 aumenta de R\$ 2.370,00 por mês para R\$ 2.810,00, enquanto que no caso 1.2 aumenta de R\$ 2.610,00 por mês para R\$ 2.810,00, fazendo com que o novo VPL de consumo do caso 1.2 (R\$ 118.530,00) passe a ser menor que o VPL de consumo do caso 1.1 (R\$ 127.470,00).

8.2 Estudos da máquina térmica ótima obtida

Este estudo se divide em oito partes que serão apresentadas duas a duas em seções distintas. É realizada a otimização da chave 8 (o grupo gerador entra em funcionamento ou não quando existe demanda elétrica), da chave 11 (o grupo gerador funciona modulando ou não a demanda elétrica), da chave 12 (o grupo gerador tenta gerar sua potência máxima ou não, sempre que ligado), chave 23 (o chiller de compressão funciona modulando ou não a demanda elétrica) e chave 24 (o chiller de compressão tenta gerar sua potência máxima ou não, sempre que ligado), baseado no caso ótimo da seção 8.1 realizando as variações da demanda elétrica, térmica e das tarifas de energia e de combustível.

Os equipamentos utilizados foram os mesmos do caso 1.1 (seção 8.1.1), ou seja, todos os dados utilizados no caso base (capítulo 6) com exceção das máquinas térmicas, onde a potência da máquina térmica 1 (microturbina) é igual a 0 kW e a potência da máquina térmica 2 (grupo gerador) é igual a 60 kW.

8.2.1 Estudo com variação da demanda elétrica.

Nesta seção será estudado o comportamento do sistema sob variações da demanda elétrica. Duas situações são criadas, a primeira a demanda elétrica é reduzida à metade e a segunda a demanda elétrica é dobrada.

A tabela 8.9 apresenta os resultados obtidos e pode-se observar nela que “VPL convenc.” significa o valor presente líquido total do sistema convencional onde toda a energia elétrica é comprada da rede pública (não há microturbina ou grupo gerador), todo o condicionamento de ar é gerado por sistemas de refrigeração com ciclos de compressão e não há armazenadores de frio. “VPL Total” indica o valor presente líquido total (investimento inicial mais consumo de energia elétrica e combustível traduzidos em valor presente) do sistema de microgeração proposto. “VPL consumo” indica o valor presente líquido apenas do consumo com energia elétrica e combustível. A diferença entre “VPL Total” e “VPL Consumo” é o valor presente líquido do investimento em equipamentos e a instalação.

Os casos indicados pelo valor -1 indicam casos em que a energia de refrigeração total gerada durante o dia (chiller de absorção mais o chiller de compressão) foi inferior à integração da carga térmica ao longo do dia; i.e., o sistema não conseguiu vencer a carga térmica imposta.

Na coluna “porcentagem do VPL de consumo ótimo” é mostrado o acréscimo no gasto com energia elétrica e combustível que ocorre entre a chave invertida ótima daquele caso estudado (célula em destaque, na mesma coluna) e a célula em questão.

Tabela 8.9: VPLs do caso estudado (caso 2.1 e caso 2.2)

					Caso 2.1 (VPL convenc. = 306.260,00)	Caso 2.2 (VPL convenc. = 650.220,00)				
8	11	12	23	24	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	284.340,00	76.690,00	6%	544.990,00	337.340,00	2%
1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	0	1	280.030,00	72.380,00	0%	541.880,00	334.230,00	1%
1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	1	1	-1	-1	-1	539.210,00	331.560,00	0%
1	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	292.990,00	85.340,00	18%	539.360,00	331.710,00	0%

Tabela 8.9: continuação

1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	364.250,00	156.600,00	116%	576.790,00	369.140,00	11%
1	0	1	1	0	364.250,00	156.600,00	116%	576.510,00	368.860,00	11%
1	0	1	0	1	364.250,00	156.600,00	116%	577.000,00	369.350,00	11%
1	0	1	0	0	364.250,00	156.600,00	116%	576.510,00	368.860,00	11%
1	0	0	1	1	-1	-1	-1	539.210,00	331.560,00	0%
1	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	292.990,00	853.40,00	18%	539.360,00	331.710,00	0%
1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1

É possível observar uma grande diferença nos valores apresentados nas colunas “porcentagem do VPL de consumo ótimo” dos dois casos. Isto ocorre devido a uma relação entre o custo de consumo com a compra da energia elétrica da rede de distribuição e o custo de consumo com o uso do combustível. No caso 2.1 existe uma baixa demanda elétrica que implica num baixo custo de consumo gerado com a compra de energia elétrica da rede de distribuição, porém em algumas configurações de chaves ocorre um uso exagerado do grupo gerador fazendo com que se gere um custo de consumo com o combustível muito elevado em relação ao custo de consumo total. No caso 2.2, como existe uma alta demanda elétrica, ocorre uma elevação exagerada do custo de consumo com a compra da energia elétrica da rede de distribuição, fazendo com que a mudança de operação do grupo gerador motivada pelas inversões das chaves tenham uma influencia bem inferior no custo de consumo total.

Toda configuração (para os casos 2.1 e 2.2) em que o chiller de compressão e o grupo gerador estão com a opção de funcionar ou com a potência igual a zero, ou com potência igual a própria demanda, ou com a potência máxima (configurações: (1 1 0 1 0), (1 1 0 0 0), (1 0 0 1 0) e (1 0 0 0 0)), o sistema de refrigeração não consegue suprir a demanda térmica. Isto ocorre porque, em algumas ocasiões no decorrer do período, o grupo gerador não entra em funcionamento havendo demanda elétrica a ser suprida (quando a demanda é menor que a potência mínima de funcionamento do grupo gerador), não ocorrendo a oferta de gases de exaustão para o chiller de absorção, e o chiller de compressão também não entra em funcionamento havendo demanda térmica a ser suprida (quando a demanda é menor que a potência mínima de funcionamento do chiller de compressão). Este tempo em que os dois chillers ficam inoperantes torna o sistema de refrigeração incapaz de suprir a demanda térmica.

Existem mais duas configurações (para os casos 2.1 e 2.2) em que o sistema de refrigeração não consegue suprir a demanda térmica. Esta situação ocorre quando a opção de funcionamento do grupo gerador é ou gerar a potência mínima, ou gerar a própria demanda elétrica, ou gerar a potência máxima e quando o chiller de compressão está na opção de funcionar ou com a potência igual a zero, ou com potência igual a própria demanda, ou com a potência máxima (configurações: (1 1 1 1 0), (1 1 1 0 0)). Isto ocorre porque, em algumas ocasiões no decorrer do período, o grupo gerador entra em funcionamento com a sua potência mínima (quando a demanda é menor que a potência mínima de funcionamento do grupo gerador), ocorrendo uma baixa oferta de gases de exaustão para o chiller de absorção, e o chiller de compressão não entra em funcionamento havendo demanda térmica a ser suprida (quando a demanda é menor que a potência mínima de funcionamento do chiller de compressão). Este tempo em que o chiller de compressão fica inoperante e o chiller de absorção funciona com uma potência muito baixa torna o sistema de refrigeração incapaz de suprir a demanda térmica.

As configurações de chaves (1 0 1 1 1), (1 0 1 1 0), (1 0 1 0 1) e (1 0 1 0 0) apresentam VPLs de consumo iguais para o caso 2.1 e diferentes para o caso 2.2. A semelhança entre os dois é que o grupo gerador e o chiller de absorção funcionaram com suas potências máximas e

a diferença ocorre no funcionamento do chiller de compressão. Os custos de consumo destas quatro configurações são iguais para o caso 2.1 porque, como a demanda elétrica é baixa, a energia elétrica gerada pelo grupo gerador foi suficiente para suprir a demanda de energia elétrica (aquela não provocada pelo próprio sistema) e a provocada pelo consumo de energia elétrica do chiller de compressão, enquanto que o custo de consumo do combustível é o mesmo para todas as quatro configurações. No caso 2.2 o custo de consumo relativo ao combustível também é igual para as quatro configurações, porém, como a demanda de energia elétrica é alta, o grupo gerador não consegue supri-la e as diferenças na forma de operação do chiller de compressão aparecem no custo de consumo (VPL consumo) quando ocorre a compra de energia elétrica da rede de distribuição. Na figura 8.19 é apresentado que a diferença na forma de atuação do chiller de compressão é apagada (em termos de custo) pelo suprimento da energia consumida pelo chiller de compressão pelo grupo gerador para o caso 2.1. A figura 8.20 mostra o gerador não conseguindo suprir esta demanda de energia elétrica, provocada pelo chiller de compressão no caso 2.2.

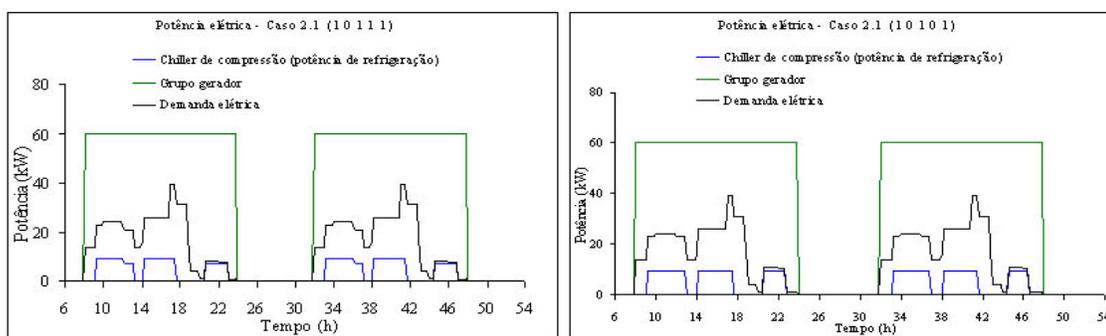


Figura 8.19: Potência elétrica no caso 2.1 ((1 0 1 1 1) e (1 0 1 0 1))

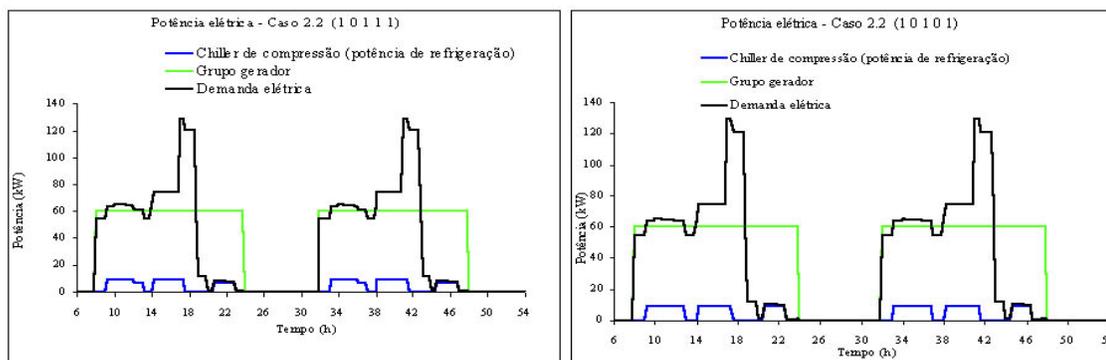


Figura 8.20: Potência elétrica no caso 2.2 ((1 0 1 1 1) e (1 0 1 0 1))

As configurações (1 1 0 1 1) e (1 0 0 1 1) proporcionam a forma de operação mais econômica para o grupo gerador e o chiller de compressão no caso 2.2, atendendo à demanda térmica requisitada. As chaves referentes ao chiller de compressão são as mesmas para as duas configurações (chave 23 = 1 e chave 24 = 1) e fazem com que o chiller de compressão ora funcione com a potência mínima, ora funcione com a potência igual à demanda térmica e ora funcione com a potência máxima. As chaves referentes ao grupo gerador não são as mesmas (chave 11 = 1 e chave 12 = 0 para a primeira configuração e chave 11 = 0 e chave 12 = 0 para a segunda configuração), porém elas impõem a mesma reação no grupo gerador fazendo-o funcionar ora com a potência máxima, ora com a potência igual à carga e quando a demanda é menor que a potência mínima que o grupo gerador pode gerar, ele é desligado. Nestas duas configurações ótimas do caso 2.2, para o caso 2.1, não ocorre o suprimento da demanda térmica, sendo (1 1 1 0 1) a configuração mais econômica.

Os custos com investimentos são iguais para os dois casos, tanto para o sistema convencional (R\$ 47.500,00), como para o sistema de cogeração (R\$ 207.650,00). O custo de consumo é o responsável pelo acréscimo no VPL total para o caso 2.2 e a redução para o caso 2.1 em relação ao caso tomado como base (caso 1.1 da seção 8.1.1), tanto no sistema de cogeração como no convencional. Caso ocorra a redução de 50 % da demanda de energia elétrica após a compra dos equipamentos, a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração, que era de 33,6 % para o caso tomado como base, será reduzida para 9,4 %. Esta redução ocorre porque o custo de investimento representa uma parcela muito alta no VPL total e é igual ao do caso base. Como existe a redução do custo de consumo no sistema de cogeração e no sistema convencional, o custo de investimento passa a ter maior peso no VPL total do caso 8.2.1. Caso ocorra o aumento da demanda de energia elétrica em 100 % após a compra dos equipamentos será também reduzida a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração para 20,5 %. Neste caso, o custo de consumo chega a ser maior que o custo de investimento, de forma que deveria haver um aumento na economia do uso do sistema de cogeração em relação ao sistema convencional devido à redução do peso do custo de investimento no custo total, porém isto não ocorre devido à compra da energia elétrica da rede de distribuição, pois a potência máxima que o grupo gerador pode gerar é bem inferior à demanda de energia elétrica.

8.2.2 Estudo com a variação da demanda térmica.

Nesta seção será estudado o comportamento do sistema sob variações da demanda térmica. São dois casos executados, onde no primeiro a carga térmica é reduzida à metade e no segundo a carga térmica é dobrada.

Os resultados são apresentados na tabela 8.10, onde os itens “VPL convenc.”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.10: VPLs do caso estudado (caso 2.3 e caso 2.4)

					Caso 2.3 (VPL convenc. = 332.980,00)	Caso 2.4 (VPL convenc. = 596.780,00)				
8	11	12	23	24	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	1	1	1	1	349.960,00	142.310,00	68%	-1	-1	-1
0	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	1	349.830,00	142.180,00	68%	-1	-1	-1
0	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	358.950,00	151.300,00	78%	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	359.000,00	151.350,00	78%	-1	-1	-1
0	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	359.510,00	151.860,00	79%	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	359.500,00	151.850,00	79%	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	1	358.950,00	151.300,00	78%	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	359.000,00	151.350,00	78%	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	299.670,00	92.020,00	8%	-1	-1	-1
1	1	1	1	0	292.500,00	84.850,00	0%	-1	-1	-1

Tabela 8.10: continuação

1	1	1	0	1	303.400,00	95.750,00	13%	-1	-1	-1
1	1	1	0	0	292.500,00	84.850,00	0%	-1	-1	-1
1	1	0	1	1	300.980,00	93.330,00	10%	-1	-1	-1
1	1	0	1	0	296.740,00	89.090,00	5%	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	304.650,00	97.000,00	14%	-1	-1	-1
1	1	0	0	0	296.740,00	89.090,00	5%	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	373.670,00	166.020,00	96%	-1	-1	-1
1	0	1	1	0	367.140,00	159.490,00	88%	-1	-1	-1
1	0	1	0	1	375.950,00	168.300,00	98%	-1	-1	-1
1	0	1	0	0	367.140,00	159.490,00	88%	-1	-1	-1
1	0	0	1	1	300.980,00	93.330,00	10%	-1	-1	-1
1	0	0	1	0	296.740,00	89.090,00	5%	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	304.650,00	97.000,00	14%	-1	-1	-1
1	0	0	0	0	296.740,00	89.090,00	5%	-1	-1	-1

No caso 2.4, o aumento da demanda térmica em 100 % torna o sistema de refrigeração incapaz de suprir esta demanda em qualquer combinação das chaves estudadas. Como no caso 2.5, a demanda térmica foi reduzida, na maioria das combinações entre as chaves, o sistema de refrigeração conseguiu suprir a demanda térmica. Todas as combinações de chaves em que o grupo gerador possuía a chave 8 na posição 0 (negligência se existe demanda elétrica a ser suprida) e chiller de compressão possuía a chave 24 na posição 0 (não permite que a geração de frio seja maior que a carga térmica) o sistema de refrigeração não conseguiu vencer a carga térmica. Isto ocorreu com as combinações (0 1 1 1 0), (0 1 1 0 0), (0 1 0 1 0), (0 1 0 0 0), (0 0 1 1 0), (0 0 1 0 0), (0 0 0 1 0) e (0 0 0 0 0) de forma que todas as combinações das chaves 23 e 24 destas oito configurações fazem com que o chiller de compressão funcione ora com a potência máxima, ora com a potência igual a própria carga térmica e quando a demanda térmica é menor que a potência mínima de funcionamento do equipamento, este permanece desligado. Em conjunto com este fato o grupo gerador liga apenas no horário de ponta, e então o chiller de absorção recebe uma baixa oferta de gases de exaustão passando pouco tempo ligado. As oito configurações restantes, nas quais o grupo gerador ligou apenas no horário de ponta o sistema de refrigeração conseguiu suprir a demanda térmica. Isto ocorreu porque quando chiller de compressão foi ligado ou oferecia sempre a potência máxima ou oferecia ao menos a potência mínima de funcionamento.

As configurações (1 1 1 1 0) e (1 1 1 0 0) proporcionam a forma de operação mais econômica para o grupo gerador e o chiller de compressão no caso 2.3, atendendo à demanda térmica requisitada. As chaves referentes ao grupo gerador são as mesmas para as duas configurações (chave 11 = 1 e chave 12 = 1) e fazem com que o grupo gerador ora funcione com a potência mínima, ora funcione com a potência igual à demanda elétrica e ora funcione com a potência máxima. As chaves referentes ao chiller de compressão não são as mesmas (chave 23 = 1 e chave 24 = 0 para a primeira configuração e chave 23 = 0 e chave 24 = 0 para a segunda configuração), porém elas impõem a mesma reação no chiller de compressão fazendo-o funcionar ora com a potência máxima, ora com a potência igual à carga e quando a demanda é menor que a potência mínima que o chiller de compressão pode gerar, ele é desligado.

O custo de investimento no sistema de cogeração (R\$ 207.650,00) é igual ao do caso dado como base (caso 1.1 da seção 8.1.1), porém o custo de investimento no sistema convencional (R\$ 26.250,00) é menor. O custo de consumo é o responsável pela redução no VPL total para o sistema de cogeração neste caso 2.3, enquanto que o custo de consumo e o custo de investimento influenciam na redução do VPL total do sistema convencional em relação ao caso dado como base. Caso ocorra a redução de 50 % da demanda térmica após a

compra dos equipamentos, a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração, que era de 33,6 % para o caso tomado como base, será reduzida para 13,8 %. Esta redução ocorre porque o custo de investimento do sistema de cogeração representa uma parcela muito alta no VPL total e é igual ao do caso base, como existe a redução do custo de consumo no sistema de cogeração, o custo de investimento passa a ter maior peso. Em contrapartida, no sistema convencional não ocorre a redução apenas do custo de consumo, mas também no custo de investimento, fazendo com que o VPL total do sistema convencional tenha uma redução maior que o VPL do sistema de cogeração.

8.2.3 Estudo com a variação da tarifa de energia elétrica

Nesta seção será estudado o comportamento do sistema sob variações da tarifa de energia elétrica. São dois casos executados, onde no primeiro a tarifa é reduzida à metade e no segundo a tarifa é dobrada.

Os resultados são apresentados na tabela 8.11, onde os itens “VPL convenc.”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.11: VPLs do caso estudado (caso 2.5 e caso 2.6)

					Caso 2.5 (VPL convenc. = 234.210,00)			Caso 2.6 (VPL convenc. = 794.330,00)		
8	11	12	23	24	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	313300,00	105.650,00	14%	332.590,00	124.940,00	4%
1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	0	1	308.680,00	101.030,00	9%	327.930,00	120.280,00	0%
1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	1	1	300.590,00	92.940,00	0%	356.570,00	148.920,00	24%
1	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	301.670,00	94.020,00	1%	363.200,00	155.550,00	29%
1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	370.070,00	162.420,00	75%	387.700,00	180.050,00	50%
1	0	1	1	0	370.060,00	162.410,00	75%	387.670,00	180.020,00	50%
1	0	1	0	1	370.070,00	162.420,00	75%	387.700,00	180.050,00	50%

Tabela 8.11: continuação

1	0	1	0	0	370.060,00	162.410,00	75%	387.670,00	180.020,00	50%
1	0	0	1	1	300.590,00	92.940,00	0%	356.570,00	148.920,00	24%
1	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	301.670,00	94.020,00	1%	363.200,00	155.550,00	29%
1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Na tabela 8.11 observa-se que todas configurações em que o grupo gerador está programado para negligenciar se ocorre demanda de energia elétrica (chave 8 = 0) o sistema de refrigeração não conseguiu suprir a demanda térmica no decorrer do período. Isto ocorre porque, nesta condição, o grupo gerador opera apenas quando ocorre horário de ponta, fazendo com que o chiller de absorção tenha um fornecimento de gases de exaustão muito baixo.

Exceto em duas ocasiões, todas as vezes que o chiller de compressão foi configurado para não permitir que a geração de frio seja maior que a carga térmica (chave 25 = 0) o sistema de refrigeração também não supriu a demanda térmica. Isto ocorreu porque nas ocasiões em que a demanda térmica foi menor que a potência mínima de funcionamento do chiller de compressão, este ficou desligado. As duas ocasiões em que a chave 25 estava configurada na posição 0 e o sistema de refrigeração supriu a demanda térmica ocorreram quando o grupo gerador estava programado para, sempre que for ligado, funcionar com a potência máxima.

Como a tarifa de energia elétrica do caso 2.5 é reduzida à metade e a do caso 2.6 é dobrada, o VPL de consumo do caso 2.5 é bem inferior, porém, observando as colunas “porcentagem do VPL de consumo ótimo”, nota-se que a variação nas porcentagens do caso 2.5 é superior ao do caso 2.6. Além disto, a configuração de chaves que acusa o VPL ótimo é diferente para os dois casos. Este fato ocorre devido à relação entre as duas parcelas do custo de consumo, custo da energia elétrica e custo do combustível. No caso 2.5 o custo de consumo com a energia elétrica é muito baixo em relação ao custo de consumo com o uso do combustível. No caso 2.6 ocorre o contrário. As variações nas posições das chaves das configurações válidas causam uma variação maior no custo de consumo do combustível em relação ao custo de consumo da energia elétrica. Como no caso 2.6 o custo de consumo com combustível afeta menos o custo de consumo total, ocorre, então, uma menor variação na porcentagem do VPL de consumo relativo ao caso ótimo e a diferença da configuração ótima obtida em relação ao caso 2.5.

Os custos com investimentos são iguais para os dois casos, tanto para o sistema convencional (R\$ 47.500,00), como para o sistema de cogeração (R\$ 207.650,00). O custo de consumo é o responsável pelo acréscimo no VPL total para o caso 2.6 e a redução para o caso 2.5 em relação ao caso tomado como base (caso 1.1 da seção 8.1.1), tanto no sistema de cogeração como no convencional.

Caso ocorra a redução de 50 % da tarifa de energia elétrica após a compra dos equipamentos, ocorrerá um prejuízo com o uso do sistema de cogeração de 22,1 %. Isto ocorre porque o custo de investimento do sistema de cogeração é muito alto em relação ao custo de consumo e ainda o custo de consumo com o combustível é bem maior que o custo gerado pela compra da energia elétrica, fazendo com que a redução da tarifa de energia elétrica provoque uma redução muito pequena no VPL total. Em contrapartida, a redução na tarifa de energia elétrica provoca uma redução bem acentuada no VPL total devido ao custo de investimento ser baixo e ao custo de consumo ser influenciado unicamente pelo uso da energia elétrica.

Caso ocorra um aumento na tarifa de energia elétrica de 100 % após a compra dos equipamentos, será ampliada a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração para 140,2 %. Neste caso, o custo de consumo com a energia elétrica influencia muito pouco no custo total de consumo, devido ao maior uso do combustível, e no VPL total, devido ao custo

de investimento muito elevado. Em contra partida, no sistema convencional, o custo de investimento é muito baixo e o custo de consumo é influenciado unicamente pelo uso da energia elétrica.

8.2.4 Estudo com a variação da tarifa do combustível.

Nesta seção será estudado o comportamento do sistema sob variações na tarifa de combustível. São dois casos executados, onde no primeiro a tarifa é reduzida à metade e no segundo a tarifa é dobrada.

Os resultados são apresentados na tabela 8.12, onde os itens “VPL convenc.”, “VPL consumo”, “VPL Total”, os resultados iguais a -1 e a coluna “Porcentagem do VPL de consumo ótimo” possuem os mesmos significados do apresentado na seção 8.1.1.

Tabela 8.12: VPLs do caso estudado (caso 2.7 e caso 2.8)

					Caso 2.7 (VPL convenc. = 420.920,00)	Caso 2.8 (VPL convenc. = 420.920,00)				
8	11	12	23	24	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo	VPL Total	VPL Consumo	Porcentagem do VPL de consumo ótimo
0	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	270.120,00	62.470,00	4%	418.950,00	211.300,00	14%
1	1	1	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	0	1	267.790,00	60.140,00	0%	409.710,00	202.060,00	9%
1	1	1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	1	1	282.110,00	74.460,00	24%	393.520,00	185.870,00	0%
1	1	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	0	0	1	285.420,00	77.770,00	29%	395.690,00	188.040,00	1%
1	1	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	1	1	1	297.680,00	90.030,00	50%	532.490,00	324.840,00	75%
1	0	1	1	0	297.660,00	90.010,00	50%	532.470,00	324.820,00	75%
1	0	1	0	1	297.680,00	90.030,00	50%	532.490,00	324.840,00	75%
1	0	1	0	0	297.660,00	90.010,00	50%	532.470,00	324.820,00	75%
1	0	0	1	1	282.110,00	74.460,00	24%	393.520,00	185.870,00	0%
1	0	0	1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	0	0	0	1	285.420,00	77.770,00	29%	395.690,00	188.040,00	1%
1	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1

Como ocorreu apenas a mudança na tarifa do combustível, verifica-se que o comportamento do sistema é o mesmo quanto ao atendimento da demanda térmica por parte do sistema de refrigeração, ou seja, pelos mesmos motivos ocorridos na seção 8.2.3, o sistema de refrigeração não conseguiu suprir a demanda térmica.

Como a tarifa do combustível do caso 2.7 é reduzida à metade e a do caso 2.8 é dobrada, o VPL de consumo do caso 2.7 é bem inferior. Observando as colunas “porcentagem do VPL de consumo ótimo”, nota-se que a variação nas porcentagens do caso 2.7 também é inferior ao do caso 2.8, ou seja, exatamente o contrário do que ocorre na tabela 8.10 da seção 8.2.3. Além disto, observa-se também que a configuração de chaves que acusa o VPL ótimo é diferente para os dois casos. Este fato ocorre pelo mesmo motivo da seção 8.2.3, ou seja, devido à relação entre as duas parcelas do custo de consumo, custo da energia elétrica e custo do combustível. No caso 2.7 o custo de consumo com o combustível é muito reduzido comparado com o custo de consumo com a energia elétrica que não é alterada. No caso 2.8 a situação é invertida. O custo de consumo com o combustível é muito aumentado comparado com o custo de consumo com a energia elétrica que não é alterada. As variações nas posições das chaves das configurações válidas causam uma variação maior no custo de consumo do combustível em relação ao custo de consumo da energia elétrica. Como no caso 2.8, o custo de consumo do combustível afeta mais o custo de consumo total, então, ocorre uma maior variação na porcentagem do VPL de consumo relativo ao caso ótimo e a diferença da configuração ótima em relação ao caso 2.7.

Os custos com investimentos são iguais para os dois casos, tanto para o sistema convencional (R\$ 47.500,00), como para o sistema de cogeração (R\$ 207.650,00). O custo de consumo é o responsável pelo acréscimo no VPL total para o caso 2.8 e a redução para o caso 2.7 em relação ao caso tomado como base (caso 1.1 da seção 8.1.1), porém apenas o sistema de cogeração é afetado pela variação da tarifa.

Caso ocorra a redução de 50 % da tarifa do combustível após a compra dos equipamentos, a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração, que era de 33,6 % para o caso tomado como base, será ampliada para 57,2 %. Isto ocorre porque, apesar do custo de investimento do sistema de cogeração ser muito alto o custo de consumo com o combustível (que é o custo de maior influência sobre o custo de consumo) é reduzido drasticamente, tornando a energia gerada pelas máquinas térmicas de preço mais baixa.

Caso ocorra um aumento na tarifa do combustível de 100 % após a compra dos equipamentos o sistema convencional, ainda assim, não será melhor que o sistema de cogeração, porém a economia provocada pelo uso do sistema de cogeração será reduzida para 7 %. Isto mostra que o aproveitamento da energia térmica contida nos gases de exaustão para a utilização em sistemas de refrigeração que não usam a energia elétrica associado com a produção de energia elétrica por máquinas térmicas pode proporcionar economia mesmo com a piora do cenário do mercado do combustível.

8.2.5 Conclusão

O resumo das configurações ótimas das chaves é apresentado na tabela 8.13 e nela é possível verificar que nos casos 2.1, 2.6 e 2.7 foram mantidas as mesmas configurações como ótimas. Da mesma forma ocorreu com os casos 2.2, 2.5 e 2.8. Isto mostra que existe uma tendência que, sobre situações anormais àquelas previstas no projeto, algumas configurações de chaves apresentam uma probabilidade maior de ser a ótima.

Tabela 8.13: Resumo final das posições ótimas das chaves

Seção	Caso	Posições ótimas das chaves
8.2.1	2.1	(1 1 1 0 1)
	2.2	(1 1 0 1 1), (1 0 0 1 1)
8.2.2	2.3	(1 1 1 1 0), (1 1 1 0 0)
	2.4	Nenhuma configuração válida
8.2.3	2.5	(1 1 0 1 1), (1 0 0 1 1)
	2.6	(1 1 1 0 1)
8.2.4	2.7	(1 1 1 0 1)
	2.8	(1 1 0 1 1), (1 0 0 1 1)

Observando todos os casos, nota-se que apenas para o caso 8.2.5 (tarifa de energia elétrica reduzida à metade) a opção de investimento no sistema de cogeração não apresentou a opção ótima de investimento. Apenas para o caso 8.2.4 (demanda térmica dobrada) o sistema de cogeração (para as configurações de equipamentos apresentados) não pode ser utilizado por incapacidade de suprir a demanda térmica.

Nesta seção será suposta a utilização de um sistema alternativo em troca do ótimo, ou seja, se o VPL ótimo foi encontrado com o uso do sistema convencional, será o sistema alternativo utilizado aquele que apresenta a configuração de chave do sistema de cogeração com o melhor VPL do caso estudado. Se o VPL ótimo foi encontrado com uma determinada configuração de chave do sistema de cogeração, será o sistema alternativo utilizado o sistema convencional do caso estudado. Com isto, pode ser realizada uma análise para verificar se é vantajoso vender os equipamentos já comprados (equipamentos do sistema alternativo) e modificar o sistema alternativo para o sistema que apresenta o VPL ótimo, mesmo com este último assumindo o prejuízo na venda dos equipamentos já comprados para o sistema alternativo.

A tabela 8.14 apresenta para cada caso, o VPL do sistema que possui a opção ótima (coluna opção ótima), o VPL do sistema alternativo (coluna alternativa), o prejuízo para mudar a opção de investimento do alternativo para o ótimo (coluna prejuízo) e o novo VPL para a opção ótima, com o prejuízo da venda dos equipamentos incluídos (coluna novo VPL).

Tabela 8.14: Resultados para mudança do sistema investido

	Opção ótima	Alternativa	Prejuízo	Novo VPL
Caso 8.2.1	Cogeração VPL = 280.030,00	Convencional VPL = 306.260,00	19.000,00	299.030,00
Caso 8.2.2	Cogeração VPL = 539.210,00	Convenciona VPL = 650.220,00	19.000,00	558.210,00
Caso 8.2.3	Cogeração VPL = 292.500,00	Convenciona VPL = 332.980,00	10.500,00	303.000,00
Caso 8.2.5	Convenciona VPL = 234.210,00	Cogeração VPL = 300.590,00	83.060,00	317.270,00
Caso 8.2.6	Cogeração VPL = 327.930,00	Convenciona VPL = 794.330,00	19.000,00	346.930,00
Caso 8.2.7	Cogeração VPL = 267.790,00	Convenciona VPL = 420.920,00	19.000,00	286.790,00
Caso 8.2.8	Cogeração VPL = 393.520,00	Convenciona VPL = 420.920,00	19.000,00	412.520,00

Na montagem da tabela, considerou-se que o valor obtido com a venda do equipamento comprado para o sistema alternativo foi apenas 60% do capital investido, ou seja, o prejuízo assumido para modificar o sistema alternativo para o que apresentou VPL ótimo é de 40 % do capital investido com equipamentos do sistema alternativo.

Observando a tabela 8.14, nota-se que para o caso 8.2.1, após a compra dos equipamentos do sistema convencional (sistema alternativo), é mais vantajoso vender os equipamentos comprados e investir no sistema de cogeração, apresentando assim, uma economia de 2,36 %. Nos outros casos em que houve alteração do sistema convencional (sistema alternativo) para o de cogeração (sistema que apresentou VPL ótimo) ocorreram os seguintes resultados: economia de 14,15 % para o caso 8.2.2, economia de 9 % para o caso 8.2.3, economia de 56,3 % para o caso 8.2.6, economia de 31,9 % para o caso 8.2.7 e economia de 2 % para o caso 8.2.8. Estes resultados mostram que, como o investimento no sistema convencional é muito baixo, a opção de investir no sistema de cogeração é viável mesmo que o sistema convencional já tenha sido implantado e esteja sendo usado. Essa mudança ainda é favorável para uma grande quantidade de situações adversas às condições iniciais de projeto que possam vir a ocorrer. Em contrapartida, no caso 8.2.5, após o investimento no sistema de cogeração (sistema alternativo), não é viável mudar empreendimento para o sistema convencional (prejuízo de 5,55 %). Isto ocorre devido ao alto custo de investimento no sistema de cogeração, que propicia um prejuízo praticamente quatro vezes maior que o prejuízo gerado quando ocorre a mudança do sistema convencional para o de cogeração. Uma vez comprado, dificilmente a troca do sistema de cogeração para o sistema convencional possibilitará alguma economia diante de um prejuízo de 40 % do valor investido.

9. CONCLUSÃO

O uso da cogeração empregando o gás natural como fonte primária de energia está sendo favorecido por minimizar o consumo desta fonte de energia primária, por diminuir as emissões atmosféricas e por ser uma alternativa para a incapaz expansão do sistema elétrico brasileiro. Desde o ano de 2000 o governo brasileiro vem incentivando a mudança do sistema convencional com estrutura monopolística (sistema hidroelétrico) para um sistema baseado na competição utilizando a iniciativa privada. Este cenário econômico brasileiro incentivou a pesquisa sobre a geração distribuída com a utilização da cogeração em escala industrial, comercial e residencial.

A total execução do projeto COGENCASA é de grande importância, pois a partir dele poderá ser obtido dados precisos para serem implantados no modelo apresentado neste trabalho. Espera-se que até setembro de 2004 todo o sistema esteja instalado, permitindo a realização das medições e ensaios mostrados no capítulo 2 que, além de fornecerem dados de entrada precisos, poderão validar o modelo. Também será implantado no modelo, ao final do projeto COGENCASA, um módulo de entrada de dados mais completo, permitindo o uso das curvas características dos equipamentos, propiciando assim resultados mais precisos quando ocorrerem as variações das condições de funcionamento dos equipamentos.

A modelagem dos equipamentos realizada com base em diagramas de blocos possibilita uma fácil visualização do fluxo de dados. Além desta forma de apresentação, é possível a visualização de gráficos contidos no modelo que apresentam a evolução de custos, de demandas térmica e elétrica e o desenvolvimento do comportamento dos equipamentos ao longo do tempo (outros gráficos para visualização de qualquer parâmetro podem ser facilmente criados). Desta forma, o modelo possibilita não somente a otimização com a variação de todas as chaves, potências e demandas, mas possibilita a interferência do usuário humano a partir das observações do comportamento global. Esta forma de construção e a fácil visualização dos resultados sendo gerados na execução do modelo também possibilita o aprendizado sobre sistemas térmicos.

O módulo de configuração de tarefas, através da variação do posicionamento de chaves mudando a forma de operação do sistema de cogeração, influencia bastante na decisão de qual opção de investimento pode ser tomada num empreendimento quanto à utilização da fonte de energia. Contudo, sua utilização, com todas as suas possibilidades e pelo método utilizado (busca exaustiva), torna a otimização comprometida. Com 26 chaves binárias e 1 chave com 5 posições, são criadas mais de 330.000.000 possibilidades que, necessitando de cerca de 10 segundos para que cada alternativa seja executada, finalizará a otimização em vários anos. Isto cria duas possibilidades: alteração do método de otimização que seja aplicável ao modelo que possui variáveis independentes Booleanas ou determinação de chaves mais influentes na obtenção do VPL ótimo.

Nos quatro casos estudados de simulação, observou-se que o sistema de cogeração foi melhor que o sistema convencional e que o VPL ótimo ocorreu com inversão da chave 8 (motor alternativo operando de acordo com a demanda elétrica) enquanto as outras chaves permaneciam na posição do caso base (apresentado no capítulo 6).

Observou-se também que, na maioria das inversões de chaves, é mantida uma relação entre os casos, ou seja, quando, num determinado caso, a inversão de chave provoca um aumento na porcentagem relativa à chave ótima, o mesmo ocorre com os três casos restantes. Na maioria das vezes que este fato não ocorre é provocado pelo não atendimento do sistema de cogeração (VPL igual a -1) à demanda térmica requisitada. Diante disto, é possível que

algumas inversões de chaves possam ser eleitas como mais prováveis de apresentarem o resultado ótimo. Através de um estudo mais extenso com variações de demandas em função das potências dos equipamentos pode ser montado um mapa onde, para cada relação entre a soma das potências dos equipamentos (soma das potências das máquinas térmicas e a soma das potências dos chillers) e as suas respectivas demandas (demandas elétricas e demandas térmicas), será utilizada a otimização de apenas um grupo escolhido de chaves. Para cada relação potência versus demanda, o modelo terá armazenado quais chaves serão utilizadas na otimização. Desta forma, o número de chaves pode ser reduzido e assim o tempo de execução do programa também diminui. Se o número de chaves for reduzido de 27 para 10, o tempo de execução passará da ordem de anos para a ordem de horas, tornando mais viável a utilização do modelo na análise de projetos.

Na primeira parte dos estudos de casos de otimização, onde se realizou a otimização de um grupo de chaves com a variação das máquinas térmicas, foi possível verificar que, em grande parte, os casos mantiveram as mesmas configurações como ótimas.

Foi obtido que dentre as configurações de máquinas térmicas estudadas, e para os dados de entrada realizados no caso base, a condição ótima é atingida com a utilização de apenas um grupo gerador com potência nominal máxima de 60 kW e que o preço das duas máquinas térmicas foi o principal fator que proporcionou este resultado. Contudo, o preço da turbina está muito elevado devido à baixa produção destes equipamentos no mercado. A produção da microturbina em larga escala é um fato de ocorrência provável nos próximos anos, o que pode provocar uma grande redução no preço deste equipamento. O preço do grupo gerador adquirido está baixo. Além deste ser produzido em larga escala, existem vários dispositivos que a microturbina oferece e o grupo gerador não (para o equipamento comprado pelo projeto COGENCASA). Como exemplo, a microturbina pode entrar em sincronismo com a rede de distribuição de energia automaticamente para realizar a venda de energia.

Alguns cenários com possíveis preços da microturbina e do grupo gerador foram observados de forma que o VPL do sistema com um grupo gerador (30 kW) e uma microturbina (30 kW) se tornasse igual ao VPL do sistema com apenas um grupo gerador de 60 kW. Através destes cenários pode ser visto que é realmente possível que o sistema de cogeração utilizando também a microturbina passe a ser a melhor escolha dentre as alternativas estudadas.

Como a microturbina proporciona mais gases de exaustão que o grupo gerador e também possui uma maior eficiência térmica, a configuração ótima do caso usando a microturbina e o grupo gerador deveria ter obtido um consumo menor que a configuração com apenas o grupo gerador, devido ao maior aproveitamento do chiller de absorção. Vários fatores, como eficiência elétrica da máquina térmica, eficiência térmica, temperatura de saída dos gases de exaustão, eficiência da caldeira de recuperação, entre outros, podem estar fazendo com que a microturbina não usufrua a vantagem que tem em relação ao grupo gerador. Observando os dados de entrada dos equipamentos é possível verificar que a eficiência da caldeira da máquina térmica 1 é igual a 0,6 e a da máquina térmica 2 é igual a 0,7. Como os dados de entrada foram baseados no projeto COGENCASA, são diferentes devido ao projeto estar intencionado em possuir dois trocadores de calor distintos na época da coleta de dados. Quando a eficiência da caldeira da máquina térmica 1 é igualada à da máquina térmica 2 o consumo do caso usando a microturbina e o grupo gerador é reduzido, fazendo com que este novo VPL de consumo deste caso passe a ser menor que o VPL de consumo do caso usando apenas o grupo gerador. Da mesma forma pôde ser avaliada a eficiência elétrica da máquina térmica 1 (0,3) e da máquina térmica 2 (0,4). Quando a eficiência elétrica da máquina térmica 2 é igualada à da máquina térmica 1 o consumo do caso

1.1 e no caso 1.2 são elevados para um mesmo valor, fazendo com que o novo VPL de consumo do caso usando a microturbina e o grupo gerador passe a ser menor que o VPL de consumo do caso usando apenas o grupo gerador.

Na segunda parte dos estudos de casos de otimização, onde se realizou a otimização de um grupo de chaves para a máquina térmica ótima obtida na primeira parte e com a variação de condições alheias às condições de projeto, também foi possível verificar que, em grande parte, os casos mantiveram as mesmas configurações como ótimas. Isto mostrou que existe uma tendência que, sobre situações anormais àquelas previstas no projeto, algumas configurações de chaves apresentam uma probabilidade maior de ser a ótima.

Observando todos os casos deste segundo estudo de otimização, notou-se que apenas para um caso (tarifa de energia elétrica reduzida à metade) a opção de investimento no sistema de cogeração não apresentou a opção ótima de investimento. Apenas para um caso (demanda térmica dobrada) o sistema de cogeração (para as configurações de equipamentos apresentados) não pôde ser utilizado, por incapacidade de suprir a demanda térmica.

Com a realização de todos estes estudos de casos foi possível aprender bastante sobre o comportamento do modelo e verificar que o posicionamento de algumas chaves do módulo de configuração de tarefas tende a ser mais relevantes na determinação do VPL ótimo. A determinação das chaves mais influentes é uma ação bastante importante para fazer com que o modelo possa ser utilizado para realizar a otimização como uso completo do módulo de configuração de tarefas.

Também pôde ser observada a importância dos modelos que realizam otimização de sistemas de cogeração de levarem em consideração a forma de operação dos equipamentos. Com demandas variáveis (o que ocorre na realidade) a forma que o conjunto de equipamentos funcionam é determinante na obtenção da melhor opção de investimento.

RECOMENDAÇÕES DE TRABALHOS FUTUROS

- Medições e ensaios usando os equipamentos do projeto COGENCASA para implantação de dados precisos no modelo.
- Introdução de dados variáveis no modelo a partir da obtenção das curvas características dos equipamentos utilizados no projeto COGENCASA.
- Introdução da contabilização da energia de backup no sistema de cogeração e da multa de ultrapassagem da demanda de energia elétrica no modelo.
- Inclusão do cálculo da troca de calor na modelagem do termoacumulador de água fria.
- Determinação das chaves mais influentes do módulo de configuração de tarefas do modelo para redução do tempo de otimização utilizando o método de busca exaustiva.
- Mudança do método de otimização utilizado no modelo para, provavelmente, algoritmo genético.
- Implantação do modelo integrado com um sistema supervisor atuando diretamente no sistema de cogeração enquanto está em operação.

10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ACCADIA, M.D., 2001. “Optimal operation of a complex thermal system: a case study. *International Journal of refrigeration*”, Vol 24, No. 4, pp.290-301.
- AGNEW, B., ALAKTIWI, A., ANDERSON, A., POTTS, I., 2004. Simulation of a Combined Rankine-absorption Cycle. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1501-1511.
- BEJAN, A., 1988. “*Advanced Engineering Thermodynamics*”. 1 ed. New York, John Wiley & Sons, 477 p.
- CARDONA, E., PIACENTINO, A., 2003. A Measurement Methodology for Monitoring a CHCP pilot plant for an Office Building. *Energy and Building*, Vol. 35, pp. 919-925.
- CARRARETTO, C., LAZZARETTO, A., 2004. A Dynamic Approach for the Optimal Electricity Dispatch in the Deregulated Market. *Energy*, (article in press).
- DUNN, S., FLAVIN, C. Dimensionando a Micro Energia. In: Estado do Mundo 2000, Salvador, ed. UMA, 2000,cap. 8, pp. 147-168
- DUTRA, J. C. C., HENRÍQUEZ, MAGNANI, F. S., PRIMO, A. R. M., FILHO, P. A., MELO N. R., SOARES, R.R., 2003. Estudo técnico e Econômico de Microcogeração em Escala Residencial: Estudo de Caso. *VI Congresso Ibero-americano de Engenharia Mecânica – CIBEM6*, Vol. I, pp. 325-330
- FERREIRA, R. G., 1998. “*Matemática Financeira Aplicada ao Mercado de Capitais*”. 4 ed. Recife, Editora Universitária, 446 p.
- GAMOU, S., Yokoyama, R. And Ito, K., 2002. Optimal unit sizing of cogeneration systems in consideration of uncertain energy demands as continuous random variables. *Energy Conversion and Management*, Vol. 43, No. 9-12, pp. 1349-1361.
- HIRSCHFELD, H., 1998. “*Engenharia Econômica e Análise de Custos*” 6 ed. São Paulo, Editora Atlas, 406 p.
- HO, J. C., CHUA, K. J., CHOU, S. K., 2004. Performance Study of a Microturbine System for Cogeneration Application. *Renewable Energy*, Vol. 29, pp. 1121-1133.
- HORLOCK, J.H. 1997, *Cogeneration-Combined Heat and Power (CHP): Thermodynamics and Economics*. krieger publishing Company, 226 p.
- INCROPERA, F. P., DEWITT, D. P., “*Fundamentos Da Transferência de Calor e de Massa*”, 4^a. ed., Rio de Janeiro, Ltc Editora, 1998, 494p.
- JUNIOR, M. A. S., GUERRERO, J. R. H., DUTRA, J. C.C., “Utilização de Recuperadores de Calor em Sistemas de Cogeração”, 1^o Congresso de P&D Petróleo e Gás da UFPE, 2003, Recife, pp. 170 – 175.

- KHAN, K. H., RASUL, M. G., KHAN, M. M. K., 2004. Energy Conservation in Buildings: Cogeneration and Cogeneration Coupled with thermal-energy Storage. *Applied Energy*, Vol. 24, pp. 1501-1511.
- KNIGHT, R., LINDER, U., MARKWORTH, N., PERZ, E., 2004. Thermo-economic Optimization of Whole Gas Turbine Plant (GTPOM). *Applied Thermal Engineering*, (article in press).
- MAGNANI, F. S., USUI, T., 2003. Financial Optimization of Micro Cogeneration Plants Using a Task Configuration System. *International Congress of Mechanical Engineering COBEM*, São Paulo.
- MANOLAS, D.A., Gialamas, T.P., Frangopoulos, C.A. and Tsahalis, D.T., 1996, A genetic algorithm for operation optimization of an industrial cogeneration system. *Computers & Chemical Engineering*, Vol. 20, No. 972, pp. 1107-S1112.
- MELO, N. R., MAGNANI, F. S., 2003. Simulação de um Sistema de Micro Cogeração a Gás Natural. *1º Congresso de P&D Petróleo e Gás da UFPE*, Recife, pp. 325 – 331.
- MELO, N. R., MAGNANI, F. S., 2004. Análise de Sistemas de Micro Cogeração Operando com Cargas Elétricas e Térmicas Variáveis, *Congresso Nacional de Engenharia Mecânica*, Belém, (trabalho aceito).
- MÍGUEZ, J. L., MURILLO, S., PORTEIRO, J., LÓPEZ, L. M., 2004. Feasibility of a New Domestic CHP Trigeneration With Heat Pump: I. Design and Development. *Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1409-1419.
- ORLANDO, J.A., *Cogeneration Design Guide*. 1 ed. Amer. Society of Heating Refrig, USA, 346 p.
- PANSINI, A.J., 1995. *Engineering economic analysis Guidebook.*, Fairmont Pr, 238 p.
- PORTEIRO, J., MÍGUEZ, J. L., MURILLO, S., LÓPEZ, L. M., 2004. Feasibility of a New Domestic CHP Trigeneration With Heat Pump: II. Availability Analysis. *Energy Applied Thermal Engineering*, Vol. 24, pp. 1421-1429.
- SZKLO, A. S., SOARES, J. B., TOLMASQUIM, M. T., 2004. Economic Potential of Natural Gas-fired Cogeneration-analysis of Brazil's Chemical Industry. *Energy Policy*, Vol. 32, pp. 1415-1428.
- SZKLO, A. S., SOARES, J. B., TOLMASQUIM, M. T., 2004. Energy Consumption Indicators and CHP Technical Potential in the Brazilian Hospital Sector. *Energy Conversion & Management*, Vol. 45, pp. 2075-2091.
- SZKLO, A. S., SOARES, J. B., TOLMASQUIM, M. T., 2000. Economic Potential of Natural gas-fired Cogeneration in Brazil: Two Case Studies. *Applied Energy*, Vol. 67, pp. 245-263.
- SZKLO, A. S., TOLMASQUIM, M. T., 2003. Analysis of Brazil's Cogeneration Legal Framework. *Energy Conversion & Management*, Vol. 44, pp. 369-380.
- SZKLO, A. S., TOLMASQUIM, M. T., 2001. Strategic Cogeneration – Fresh Horizons for the Development of Cogeneration in Brazil. *Applied Energy*, Vol. 69, pp. 257-268.

- STOECKER, W.F., 1989. *Design of Thermal Systems*. 3 ed. New York, McGraw-hill, 565 p.
- VIEIRA, L. S., DONATELLI, J. L., CRUZ, M. E., 2004. Integration of an iterative Methodology for Exergoeconomic Improvement of Thermal Systems With a Process Simulator. *Energy Conversion & Management*, Vol. 45, pp. 2495-2523.
- WISCHHUSEN, S., SCHMITZ, G., 2004. Transient Simulation as an Economical Analysis Method for Energy Supply Systems for Buildings or Industry. *Applied Thermal Engineering*, (article in press).

ANEXO I

EQUIPAMENTOS DO PROJETO COGENCASA

Todos os equipamentos foram adquiridos com fundos provenientes da UFPE, FINEP, Petrobrás e Copergás e as suas aquisições foram realizadas entre o final do ano de 2002 e todo o decorrer do ano de 2003, o que trará uma necessidade de se rever todo o investimento necessário para atualizar os dados do modelo quando for utilizado para realizar o estudo de viabilidade técnica e econômica do projeto COGENCASA. Os equipamentos utilizados são uma câmara climatizada com um split instalado, um grupo gerador, uma microturbina, dois trocadores de calor, um chiller de absorção, uma torre de resfriamento e três termoacumuladores (um de água quente e dois de água fria).

1 Câmara Climatizada

O projeto COGENCASA possui uma câmara climatizada bi-partida com duas antecâmaras para minimizar os efeitos do ambiente externo, o que possibilita a realização de vários experimentos, entre eles analisar o desempenho de equipamentos como chiller, termoacumuladores, sistemas de refrigeração em geral. A câmara, de fabricação da empresa Polifrio, foi projetada de modo a permitir trabalhos entre -15 e 30 °C e utiliza como isolante poliestireno expandido. O princípio de projeto e construção é idêntico ao de câmaras frigoríficas.

No projeto COGENCASA, inicialmente será avaliado o desempenho do chiller de absorção comparado com um split. Numa parte da câmara estará entrando uma tubulação com a água fria vinda do chiller, e na outra parte da câmara, estará ligado o split. Resistências elétricas instaladas em ambos os ambientes, simularão temperaturas diversas, e os efeitos dessas variações serão analisados. A seguir (tabela 2.1) são mostradas as características do projeto e os detalhamentos da câmara (figura 2.3).

Tabela 1 – Características do projeto da câmara

Ambiente:	Congelados	Câmara +30° C	Ante-câmaras
Dimensões internas:	3,00 x 3,00 x 2,50	2,40 x 3,00 x 2,50	1,33 x 1,15 x 2,80/ 1,33 x 1,15 x 2,80
Área do piso:	9,00 m ²	7,20 m ²	2,07/2,07 m ²
Volume:	22,50 m ³	18,00 m ³	5,80/5,80 m ³
Espessura do isolamento:	20 cm	20 cm	20 cm
Isolamento:			
Parede:	38,64 m ² de Isopainel 2 Faces	25,76 m ² de Isopainel 2 Faces	28,98 m ² de Isopainel 2 Faces
Teto:	11,73 m ² de Isopainel 2 Faces	8,97 m ² de Isopainel 2 Faces	6,22 m ² de Isopainel 2 Faces
Piso:	10,80 m ² de Isopoli	10,80 m ² de Isopoli	Sem isolamento
Temperatura:			
Interna da câmara:	-15° C	+30° C	-
Externa da câmara:	+35° C	+35° C	-
Produto fecebido:	-15° C	-	-
Portas:			
Dimensões:	0,80 x 1,80 x 0,15	0,80 x 1,80 x 0,15	0,80 x 1,80 x 0,15
Tipo:	G-D-CR-4B	G-D-SR-4B	G-D-SR-4B
Quantidade	01	01	02

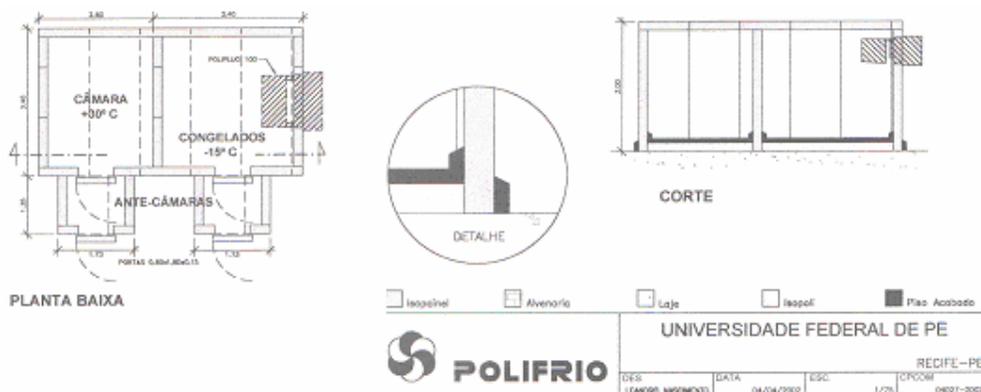


Figura 1 - Desenho da câmara

2 Grupo Gerador (motor alternativo)

Os grupos geradores são equipamentos utilizados para a geração de energia elétrica através de um motor acoplado a um alternador. A energia térmica proveniente da combustão da mistura de ar e combustível é transformada em energia mecânica e transferida através de um eixo ao alternador que assim gerará a energia.

Um dado de grande importância para os motores de combustão interna é a taxa de compressão. Esta taxa é a relação matemática que indica quantas vezes a mistura ar/combustível ou simplesmente o ar aspirado (no caso do motor diesel) para dentro dos cilindros pelo pistão é comprimido dentro da câmara de combustão antes que se inicie o processo de queima. Assim, um motor a gasolina que tenha especificado uma taxa de compressão de 8:1, por exemplo, indica que o volume aspirado para dentro do cilindro foi comprimido oito vezes antes que a centelha da vela iniciasse a combustão. Do ponto de vista termodinâmico, a taxa de compressão é diretamente responsável pelo rendimento térmico do motor. Assim, quanto maior a taxa de compressão, melhor será o aproveitamento energético que o motor estará fazendo do combustível consumido. Por esse motivo é que os motores diesel consomem menos que um similar a gasolina, funcionando com taxas de compressão altíssimas (17:1 nos turbo diesel e 22:1 nos dieséis aspirados), gerando a mesma potência e consumindo menos combustível. Há limitações físicas e técnicas para a simples ampliação da taxa de compressão. No primeiro caso, ocorre a dificuldade de obtenção de câmaras de combustão minúsculas. No seguinte destacam-se restrições técnicas quanto às propriedades do combustível, isto é, o quanto cada um “tolera” de compressão antes de se auto-inflamar (octanagem). Um motor especialmente projetado ou adequadamente adaptado para o uso de GNV (gás natural veicular) opera normalmente com altas taxas de compressão (da ordem de 14/1 a 16/1), permitidas em função do elevado poder anti-detonante inerente ao GN (gás natural), e portanto apresenta uma eficiência térmica superior se comparado a motores a gasolina ou álcool hidratado. Para o caso dos veículos, devido à necessidade de conciliar a operação da forma "bicomcombustível", em função de uma rede de abastecimento ainda limitada, os veículos convertidos devem manter as taxas de compressão originais de seus motores a gasolina (8/1) ou álcool hidratado (12/1), o que pode acarretar uma sub-utilização das características originais do GNV e uma aparente perda de potência.

O metano é o mais simples e estável combustível da família dos hidrocarbonetos e possui a maior relação hidrogênio/carbono (4 para 1) dentre os hidrocarbonetos, resultando numa queima menos poluente e gerando índices de emissões inferiores na maior parte das condições de operação de motores. A taxa de compressão bem mais elevada não acarreta problemas ao motor devido ao metano possuir uma excepcional característica anti-detonante, de forma que o índice de octanas do gás natural é bem superior do que a maioria dos combustíveis líquidos. Como nenhum ou pouco carbono é formado durante a combustão, o motor movido a gás se mantém em boas condições de limpeza e assim observam-se menores

taxas de desgastes para um mesmo período de utilização, quando comparado com motores alimentados por combustíveis líquidos.

O grupo gerador está equipado com um motor GM Powertrain que possui um sistema de injeção de combustível LPG ou NG, da PSI (Power Solutions, INC.), que atua através de governador de velocidade no corpo de borboleta de aceleração no coletor de admissão, regulando a quantidade de mistura ar/gás natural, com a finalidade de manter o motor em uma rotação padrão de 1800 rpm, padrão este estabelecido pelo fabricante do grupo gerador para se gerar os 37,5 KVA/ 30 KW, referentes ao projeto do mesmo. Segundo o fabricante do grupo gerador o referido sistema de injeção de combustível (gás natural) não se caracteriza pela adaptação de uma injeção eletrônica de combustível líquido (gasolina), mas sim um sistema único e exclusivo para o uso de gás natural em motores estacionários montados em grupos geradores. Também de acordo com o fabricante deste, os motores são fornecidos para o uso único de gás natural e já se encontram com as devidas modificações para o recebimento e perfeito trabalho de combustão.

O grupo gerador apresenta-se cabinado e insonorizado (figura 2), e possui dimensões de 1,10 m de largura, 3,30 m de comprimento e 1,6 m de altura. O controle e a visualização dos parâmetros de operação do grupo gerador são realizados em um painel equipado com voltímetro, freqüencímetro, amperímetro, chave seletora de tensão, chave seletora de corrente, sinaleiro de carga na bateria, botão liga carga, botão liga a carga na rede, botão desligar carga, termômetro da água, manômetro do óleo, taquímetro com contador auxiliar e modulo automotivo.



Figura 2 – Foto do grupo gerador

Dentre o extenso aparelhamento existente no grupo gerador, alguns serão destacados nesta seção: Módulo de automatismo, regulador de tensão, relés de partida, regularizador de pressão e controlador de velocidade na aspiração.

O módulo de automatismo possui a função de controlar e proteger um grupo gerador. Uma vez ativado ele é responsável por todo procedimento de partida e parada do motor, indicando a posição operacional e condições de defeito, desligando automaticamente o motor e apresentando a condição de falha através de LEDs no painel frontal além de emitir um sinal sonoro para alertar o operador.

O regulador de tensão do grupo gerador (figura 3) protege o alternador, o motor e a si próprio contra variações rápidas de freqüência em torno do valor nominal, permitindo uma

melhor recuperação do grupo diante de graus bruscos de carga e deixando a tensão estabilizada no valor ajustável do equipamento.



Figura 3 – Foto do regulador de tensão

O acionamento do grupo gerador é realizado através de três relês de partida (figura 4) que estão visualizados na figura 2.6, onde um deles acionará o motor de partida, outro acionará a solenóide de entrada do gás e o terceiro acionará o regulador de pressão.



Figura 4 – Relês de Partida

O grupo gerador possui um regularizador de pressão para a entrada do gás natural que pode ser visto na figura 5. Este reduz a pressão, para que possa ocorrer a mistura do gás com o ar.



Figura 5 - Regulador de Pressão

Como o motor é aspirado, ele possui um controlador de velocidade, que pode ser visto na figura 6. O regulador de tensão, através de um sensor (pick-up), verifica qual a rotação do motor e verifica também se é necessário aumentá-la para suprir a tensão e a potência requerida pela rede ou pelos equipamentos que estejam usando a energia gerada pelo gerador. As informações assim são passadas para o atuador (marca Woodward), que efetivamente realiza o controle da velocidade da mistura ar combustível.



Figura 6 – Controlador de Velocidade de aspiração

As demais especificações técnicas podem ser visualizadas na tabela 2.2.

Tabela 2 – Demais especificações técnicas do grupo gerador

Ficha Técnica do Motor	
Marca	GM PSI
Modelo	VORTEC
Rotação	1800 RPM
Combustível	Gás natural
Tipo	4 tempos
Ciclo	Otto
Ignição	Eletrônica
Injeção	Aspirado
Cilindrada	4,3 L
Posicionamento dos cilindros	V 6
Sistema de governo	Eletrônico
Filtro de ar	Filtro seco
Partida elétrica	12 Vcc
Aspiração	Natural
Refrigeração	Refr. a água
Temperatura dos gases de exaustão	500 graus C
Taxa de Compressão do Motor	9,4:1,
Ficha Técnica do Alternador	
Marca	Negrini
Modelo	ATEC
BRUSHLESS	Sem escovas
Regulador de tensão	Eletrônico
Tipo de ligação	Estrela
Fator de potencia	0,8 indutivo

3 Microturbina

A microturbina Capstone (figura 7) é um sistema de geração de energia de fácil adaptação, com baixas emissões e que requer pouca manutenção. Basicamente trata-se de um gerador movido por uma turbina de alta velocidade acoplada a um controlador digital de potência que produz energia elétrica. Ela pode ser ligada em paralelo com a rede ou a outro gerador e pode atuar como um simples gerador para reserva, segurança ou em lugares remotos, onde não há uma rede de energia elétrica. Há também a possibilidade de se ter várias microturbinas trabalhando acopladas e funcionando como um único gerador de grande capacidade.

Além de gerar energia elétrica, a microturbina também disponibiliza energia térmica através dos gases de exaustão, que podem ser usados diretamente por serem secos e ricos em oxigênio, devido à tecnologia de combustão que produz um nível de emissões extremamente baixo, caracterizado por menos de 9 partes por milhão de NO_x (óxido de nitrogênio).



Figura 7: Foto da Microturbina

A microturbina é uma turbina de combustão que é composta por um compressor, um regenerador, um combustor, uma turbina e um gerador. Os componentes rotativos são montados em um único eixo suportado por mancais a ar e gira a até 96.000 rpm. O gerador de ímã (figura 8) permanente é resfriado pelo fluxo de ar dentro da microturbina. As saídas do gerador são voltagem e frequência de potência AC variáveis.

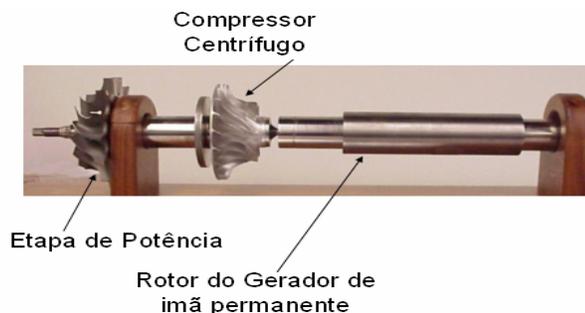


Figura 8: Foto do Eixo da microturbina – Mancais lubrificados a Ar

O controle digital de potência controla toda a microturbina e todos os seus mecanismos. Ele executa as funções de conversão de energia, enquanto converte energia de frequência variável do gerador para voltagem DC e então para corrente AC de frequência constante ou corrente DC de voltagem variável. Durante a partida da turbina, o controle digital de potência opera como um regulador de frequência, e movimenta o gerador até que a energia gerada pela microturbina esteja disponível. Ele também funciona como um regulador durante o ciclo de resfriamento no desligamento para dissipar o calor armazenado no regenerador e na estrutura da máquina com a finalidade de proteger seus vários componentes.

As funções de escolha, controle e monitoramento da microturbina são feitas através de um painel de display, pela porta de interface com o usuário e pela porta de interface de manutenção. Algumas operações de comunicação são realizadas via terminais de ligação. As comunicações primárias de usuário incluem:

- Estabelecer parâmetros operacionais e configurações;
- Ligar e desligar a microturbina;
- Ajustar a saída de energia;
- Recuperar dados operacionais.

As funções das comunicações de manutenção incluem:

- Estabelecer modos de operação;
- Estabelecer parâmetros de operação “set point”/ limites;
- Estabelecer modos e parâmetros de despacho;
- Recuperar dados de eventos e problemas.

Tabela 3: Dados técnicos da microturbina Capstone

Tubulação de entrada de gás	Conector (JIC) NA-12 37° Macho - Adaptador Fêmea 1/2" NPT
Vazão de gás (máxima)	4 (6,5) Nm ³ /hr
Pressão do gás	3,7 atm (55 psig)
Temperatura máxima do gás	50°C
PCI	36500 - 44180 kJ/Nm ³
Vazão de ar	16 Nm ³ /min
Temperatura dos gases de exaustão	261 - 315°C
Vazão dos gases de exaustão	17 Nm ³ /min
Contrapressão máxima permitida	0,2 mca
Cabeamento	4 cabos Wye 480V

4 Trocador de Calor

4.1 Trocador de Calor da Microturbina

O sistema de recuperação de calor MICOGEN para microturbinas Capstone foi desenvolvido pela Unifin Internacional em conjunto com a Capstone. O sistema de recuperação de calor aumenta a eficiência e o retorno financeiro da geração da microturbina através da recuperação do calor dos gases de combustão.

O sistema completo MICOGEN de recuperação de calor reduz a necessidade do custo de projeto de engenharia, deixando apenas questões de aplicação e instalação, que frequentemente requerem simplesmente tubulações e licença. Quando a recuperação de calor dos gases de exaustão não é mais necessária, os gases podem ser redirecionados para

atmosfera através de uma válvula do tipo divisor instalada no trocador de calor, acionada por um atuador eletromecânico (figura 9), onde também é possível controlar a vazão dos gases que são lançados na atmosfera, ou seja, regulando a quantidade de calor necessária ao processo e permitindo uma geração contínua de energia elétrica. Como este equipamento foi desenvolvido em conjunto com a Capstone, o sistema MICOGEN opera com um impacto mínimo na performance da microturbina.

O sistema de recuperação de calor possui:

- Feixe tubular do sistema de recuperação de calor utilizando tubos aletados de alumínio extrudado para promover uma alta durabilidade;
- Cabine do trocador com uma válvula integral para by-pass dos gases de exaustão, incluindo o atuador da válvula e os controles;
- Bomba d'água e tubos associados para e do trocador;
- Cabine isolada para promover segurança, redução de ruídos e propriedades estéticas;
- Caixa de controles elétricos e os sensores necessários para segurança e funções de operação automáticas;
- Dutos isolados da microturbina Capstone para o MICOGEN para configurações padrão de instalação.

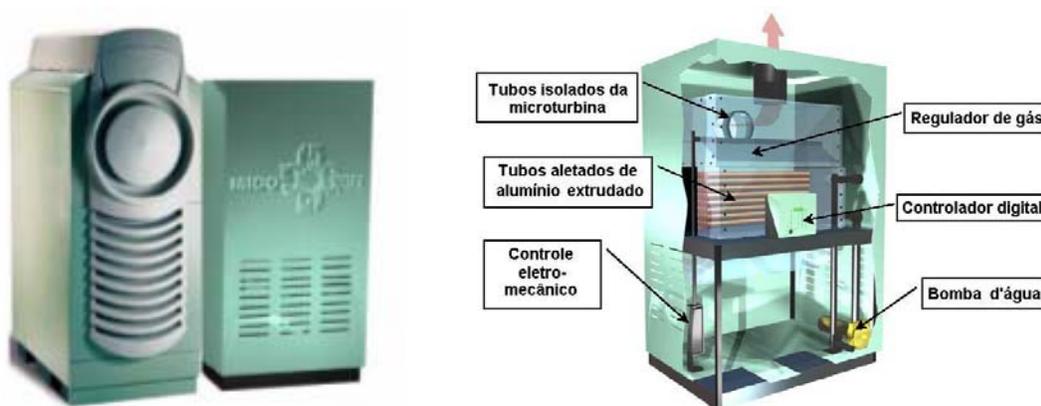


Figura 9 – Recuperador junto a microturbina e corte do recuperador

O controlador digital monitora as temperaturas do gás e da água para assegurar uma operação segura e eficiente.

- Monitora o fluxo de água para evitar superaquecimento;
- Estabelece set points de temperatura para controle mais refinado;
- Inicia o status de entrada da turbina;
- Oferece a partida automática/manual.

A figura 10 mostra detalhes das instalações da microturbina com o Micogen, que permite observar como os gases de exaustão são direcionados para o recuperador de calor, as dimensões das tubulações e a tubulação de exaustão dos gases do Micogen. As tubulações devidamente isoladas termicamente são compradas juntamente com o recuperador de calor.

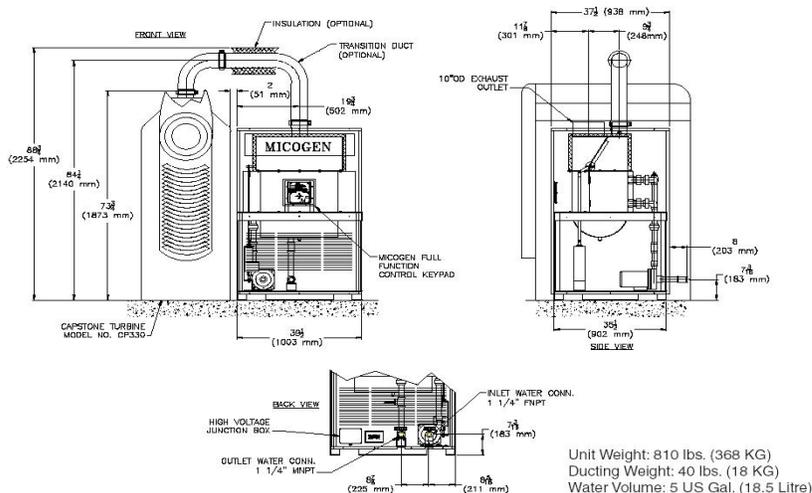


Figura 10 – Detalhamento das instalações da microturbina com o Micogen

A tabela 4 mostra dados técnicos do recuperador de calor Micogen

Tabela 4 – Dados técnicos do recuperador de calor Micogen

Fluxo de Água	2,13 kg/s
Pressão máxima da água	10 bar
Temperatura da água	
Entrada	80°C
Saída	88°C
Perda de carga (água)	5,5 mca
Temperatura dos gases	
Entrada	260°C
Saída	108°C
Carga térmica	50 kW
Diâmetro da tubulação de água (circuito Chiller-Recuperador)	1 1/2"

4.2 Trocador de Calor do Grupo gerador

O trocador de calor a ser usado no grupo gerador deverá ser também do tipo compacto, como no caso da microturbina. Deverá ser de menores dimensões, pois o motor não trabalha com o mesmo excesso de ar usado na microturbina. Este equipamento será dimensionado usando os softwares desenvolvidos pelo grupo para simular trocadores casco-e-tubos, duplotubo, e trocadores compactos. Depois de definida a área de troca de calor, será procurado e adquirido o trocador mais próximo do especificado, junto aos fabricantes que possuam esse equipamento em prateleira. Os primeiros passos foram realizados como em Silva et al (2003).

É intenção dos integrantes do projeto COGENCASA tentar captar recursos para desenvolver um trocador padrão para motores a gás natural, assim como tentar reproduzir o trocador a ser adquirido para a microturbina, com o intuito de nacionalizar sua fabricação.

5 Chiller de Absorção

Um chiller de absorção é um equipamento de refrigeração para produção de frio, cujo ciclo funciona com uma fonte de calor substituindo o compressor utilizado nos sistemas de refrigeração por compressão. Essa fonte de calor pode, por exemplo, ser o calor rejeitado em máquinas térmicas. Apesar de ser um sistema de baixo COP, os equipamentos de refrigeração por absorção são plenamente justificáveis e até mesmo desejados, quando há calor sendo desperdiçado, como nos casos de geração térmica de energia, sendo o chiller um dos equipamentos que influenciam positivamente na viabilidade de projetos de cogeração. O

sistema de refrigeração por absorção não utiliza compressores, os quais são conhecidos como a parte mais dispendiosa dos sistemas de refrigeração por compressão. O compressor é substituído por um conjunto absorvedor/gerador e periféricos, onde circula uma solução. Os outros itens (condensador, dispositivo de expansão e evaporador) são comuns aos dois sistemas (compressão e absorção). Os fluidos de trabalho mais empregados para a mencionada solução são os pares água - amônia e brometo de lítio - água. Quando se refere a uma solução com um par x-y, o segundo fluido mencionado é o fluido refrigerante, o qual circula no condensador, dispositivo de expansão e evaporador. Assim sendo, quando o par é brometo de lítio - água, a água circula no evaporador, limitando as trocas térmicas a temperaturas positivas, pelo ponto de solidificação da água. Quando o par é água - amônia, a amônia circula no condensador, dispositivo de expansão e evaporador, viabilizando trocas térmicas a temperaturas negativas no evaporador.

Considerando o sistema brometo de lítio - água, o vapor d'água, ao sair do evaporador, entra no absorvedor, onde se mistura com a solução de brometo de lítio - água, tornando-a fraca em concentração de brometo de lítio, pois aumentou o percentual de água na solução. Essa solução é então bombeada até o gerador, ao mesmo tempo em que está sendo pré-aquecida com a solução que está saindo do gerador. Ao chegar ao gerador, a solução pobre em brometo de lítio é aquecida, fazendo evaporar a água presente, tornando a solução rica em brometo de lítio. A solução rica em brometo de lítio, aquecida no gerador, desce para o absorvedor, pré-aquecendo (contato indireto, sem mistura) a solução ascendente (pobre em brometo de lítio). O evaporador e o absorvedor operam à mesma pressão (região de baixa pressão) e são acondicionados em um mesmo compartimento. O gerador e o condensador operam a uma mesma pressão (região de alta pressão), estando em um mesmo compartimento. No evaporador coloca-se uma bomba de recirculação para aumentar a taxa de transferência de calor, a qual pulveriza a água a ser evaporada nos tubos do evaporador, para resfriar a água da carga de refrigeração. Não é preciso lembrar que a água gelada produzida faz parte de um circuito diferente daquela que circula no evaporador como refrigerante. Isso facilita a manutenção, pois confere mais pureza ao refrigerante e permite que a água que serve à carga de refrigeração opere a pressões acima da atmosférica, lembrando que a água como refrigerante no evaporador opera a pressões muito abaixo da atmosférica. O gerador é a parte do sistema que recebe as mais altas temperaturas. Um sistema de simples efeito possui um gerador. Sistemas de duplo efeito são mais eficientes (e mais caros) e possuem dois geradores. A figura 11 mostra um esquema simplificado de um sistema de absorção (www.yazakienergy.com).

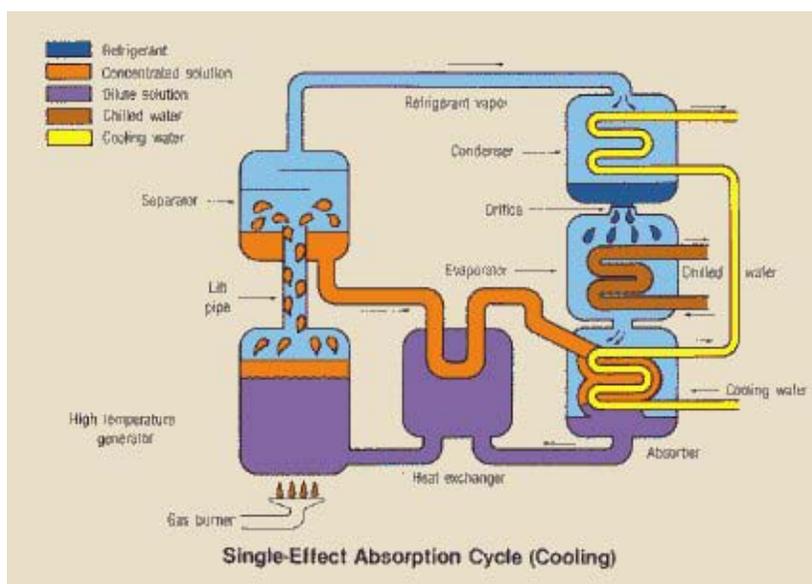


Figura 11 – Esquema simplificado de um sistema de absorção (www.yazakienergy.com)

No projeto COGENCASA o sistema escolhido foi o brometo de lítio - água. O gerador pode operar com água quente, vapor ou queima direta. Foi escolhida a operação com água quente, provinda dos trocadores de calor, nos quais a água é aquecida pelos gases de exaustão do motor e da turbina. Foi escolhido um sistema de simples efeito (um gerador), operando a água quente, com 10 TR de capacidade. A figura 12 mostra detalhes do chiller a ser utilizado no experimento (Marca: YAZAKI – Simples Efeito – WFC-10). Em seguida é mostrado um exemplo de operação para o mencionado chiller (tabela 5).

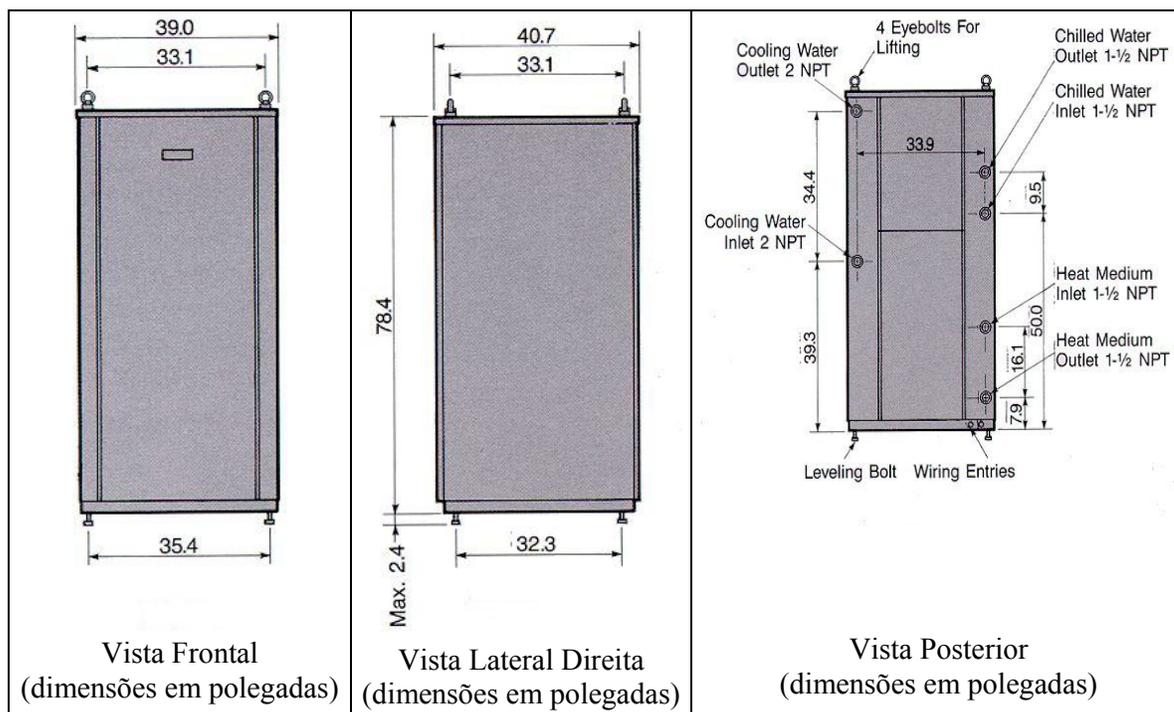


Figura 12 – Dimensões (em polegadas) de um Chiller Yazaki modelo WFC-10
(www.yazakienergy.com)

Marca: YAZAKI WC 10
 Capacidade: 10TR
 Fluidos de Trabalho: Lítio-Bromo e Água
 Operação: Água Quente 75°C a 100°C
 Peso: 800 kg
 Potência: 208/230V
 Frequência: 60HZ
 Consumo de Potência: 30W

Tabela 5 – Exemplo de operação

Água Gelada:
Capacidade de Refrigeração: 119MBH (1MBH=BTU/hrx10 ³)
Temperatura de Entrada: 14°C
Temperatura de Saída: 9°C
Tubulação de Entrada: 1 ½ “ (38,1mm)
Tubulação de Saída: 1 ½ “ (38,1mm)
Queda de Pressão: 38 kPa
Vazão: 102,3 l/min= 1,7 l/s
1 US galão = 231 in ³ = 3,785 litros
Água Quente:

Tabela 5 – continuação

Calor Cedido ao Gerador: 170,1 MBH (1MBH=BTU/hrx10 ³)
Temperatura de Entrada: 88°C
Temperatura de Saída: 83°C
Tubulação de Entrada: 1 ½ “ (38,1mm)
Tubulação de Saída: 1 ½ “ (38,1mm)
Queda de Pressão: 26,9 kPa
Vazão: 146,475 l/min= 2,44 l/s
1 US galão = 231 in ³ = 3,785 litros
Água de Resfriamento:
Calor Rejeitado para a Torre: 289,1 MBH (1MBH=BTU/hrx10 ³)
Temperatura de Entrada: 29,4°C
Temperatura de Saída (para a torre): 34,4°C
Tubulação de Entrada: 2 “ (50,8mm)
Tubulação de Saída: 2 “ (50,8mm)
Queda de Pressão: 67 kPa
Vazão: 248,775 l/min= 4,15 l/s
1 US galão = 231 in ³ = 3,785 litros

6 Torre de Resfriamento

A Torre de Resfriamento tem a função de diminuir a temperatura de um fluido (geralmente água), que entra pela parte superior da torre, descendo lentamente por gravidade, através do gotejamento feito por bicos distribuidores, através de “enchimentos” de diferentes tipos, em contracorrente com uma corrente de ar frio (normalmente à temperatura ambiente). No contato direto das correntes de água e ar ocorre a evaporação da água, principal fenômeno que produz seu resfriamento.

O projeto de uma torre de resfriamento parte dos valores da vazão e da temperatura da água a ser resfriada. Então, uma vez especificada a geometria da torre em termos de suas dimensões e tipo de enchimento, o funcionamento adequado dependerá do controle da vazão de ar. Em termos de insumo energético, a torre demandará potência para fazer escoar o ar, sendo que o enchimento da torre é um elemento que introduz perda de carga; a água deverá ser bombeada até o ponto de aspersão. A figura 13 mostra a vista posterior da torre escolhida: Modelo 12/2-W20-II da Alpina.



Figura 13 – Vista posterior da torre de resfriamento: Modelo 12/2-W20-II da Alpina

A tabela 6 mostra os dados técnicos da torre de resfriamento

Tabela 6 – Dados Técnicos da Torre de Resfriamento

Dados de Projeto	
Carga Térmica	75.000 kcal/h
Vazão de Água Total	10,0 m ³ /h
Temperatura da água quente	37 °C
Temperatura da água fria	29,5 °C
Temperatura de Bulbo Úmido	26,5 °C
Nível de Ruído	Silencioso
Pressão Sonora por Ventilador, a 2 m	72 dB(A)
Instalação	
Aplicação	Resfriar água do Chiller
Localização da torre de resfriamento	Ver desenhos anexos (não há obstáculos à passagem de ar)
Croquis da instalação completa com os comprimentos e diâmetros da tubulação	Ver desenhos anexos

7 Termoacumuladores

O processo de armazenamento de água fria será realizado utilizando o conceito de termoacumulação por calor sensível através da estocagem de água gelada proveniente do Chiller. Para o sistema COGENCASA serão utilizados dois tanques de armazenamento de 1000 litros cada um de modo a implementar uma técnica conhecida como Método do Tanque Vazio. Esta técnica evita o contato direto entre a água gelada estocada e a água “quente” proveniente do retorno após o uso da energia térmica armazenada. Durante o Processo de carregamento do armazenador a água gelada proveniente do Chiller será estocada num dos tanques, enquanto o outro permanece vazio. No processo de uso da energia armazenada, a água gelada será usada para suprir a demanda de frio da câmara climatizada e da copa, simulando os vários cenários possíveis. A água “aquecida” após o uso retorna para o tanque vazio fechando o ciclo carregamento/descarregamento do armazenador. A partir de então, um novo ciclo terá início com o resfriamento da água pelo Chiller.

Construtivamente os armazenadores consistem de duas caixas d’água comerciais fabricadas em fibra de vidro, e revestidas externamente com isolamento de poliuretano. Para que o armazenador seja abastecido com água, o Chiller deverá operar durante 9 minutos (a vazão de água gelada do Chiller é de 102,3 l/min para 1000 l). O tempo de uso da energia armazenada sobre forma de frio será determinado de acordo com as necessidades dos fan-coils instalados, o que será definido pelo tipo de ensaio que será realizado. A opção por um isolamento em poliuretano foi devido a uma doação conseguida pelo grupo de pesquisa do projeto COGENCASA junto a uma industria local. Há no mercado opções de se utilizar também poliestileno expandido ou um revestimento em fibra de vidro, porém com custos mais elevados.

O termoacumulador de água quente encontra-se ainda em fase de estudos.

8 Instrumentação

A instrumentação do projeto foi definida após a identificação dos parâmetros mais relevantes a serem medidos do projeto Cogencasa. Estas informações serão relevantes para uma análise global do sistema como também para fazer análises de desempenho dos equipamentos individuais que conformam o sistema de Microcogeração. A partir destas considerações, foram definidos os tipos de parâmetros que serão levantados (temperatura, vazão, medidas elétricas, análise dos gases da combustão, consumo de gás natural, etc), os

sensores que serão usados para medir estas grandezas, os pontos de medições no diagrama e a forma de aquisição. A instrumentação do sistema de microcogeração COGENCASA consiste em sensores para medidas de temperatura e vazão, medidores de parâmetros elétricos e analisador de gás. A tabela 7 mostra um resumo sobre as medidas que serão realizadas, destacando a localização dos sensores, forma de aquisição das medidas, tipo de instrumentação usada e fixação desta. A aquisição das grandezas físicas será realizada pelo sistema de controle através de sensores específicos acoplados ao PLC. Os sinais adquiridos serão tratados e gerenciados por um software supervisor interligado ao PLC. Assim, o sistema de controle poderá monitorar e controlar o processo de funcionamento do sistema de Microcogeração e ao mesmo tempo disponibilizar estas informações ao usuário para análise das condições de operação do sistema COGENCASA. O sistema automático permitirá o comando de 8 válvulas solenóides, o controle em malha fechada das vazões de sete bombas centrífugas, o monitoramento da temperatura de vinte e nove pontos e o monitoramento dos parâmetros elétricos da rede, do Grupo Gerador, da Microturbina e do Split. Para o controle em malha fechada serão utilizados inversores de frequência e transdutores de vazão, de modo que a partir de um set point de vazão definido pelo usuário, o CLP enviará um sinal para o inversor para que altere a vazão da bomba, enquanto o transdutor de vazão informa ao CLP a vazão real. As variáveis bem como um histórico dos alarmes com a data, o horário e a natureza do evento estarão disponibilizados através de uma rotina para aquisição de dados, permitindo ao usuário obter importantes elementos para análise das condições de operação dos sistema. O sistema permitirá ainda o controle das cargas relativas aos bancos de resistência acoplados à Microturbina e ao Grupo Gerador. O CLP disponibilizará 20 saídas digitais que, através de uma rotina específica, permitirá o controle percentual das cargas.

Tabela 7 – Descrição e localização dos sensores e forma de aquisição das grandezas

Sensor	Medida	Localização/ Fixação	Aquisição
Sonda coletora de amostra	Análise de gases	saída dos gases da turbina e do motor / introdução de uma sonda coletora de amostra	Analisador de gases
Modulo de medição de parâmetros elétricos	Grandezas elétricas da Microturbina: Potencia, Voltagem, Corrente, etc	Microturbina	PLC
Modulo de medição de parâmetros elétricos	Grandezas elétricas do Grupo Gerador: Potencia, Voltagem, Corrente, etc	Grupo Gerador	PLC
Modulo de medição de parâmetros elétricos	Grandezas elétricas do banco de resistência.	Banco de resistência da Microturbina	PLC
Modulo de medição de parâmetros elétricos	Grandezas elétricas do banco de resistência	Banco de resistência do Motor	PLC
Medidor de vazão para gás natural	Vazão de gás natural na Microturbina e grupo gerador	Entrada da Microturbina e Grupo Gerador / Instalado na tubulação num bypass.	PLC
Medidor de vazão tipo anemômetro de fio quente	Vazão de ar admitido no motor	Entrada de ar do motor	PLC

Tabela 7 – continuação

Transdutor de vazão tipo turbina	Vazão de água no recuperador de calor da Microturbina	Entrada do recuperador	PLC
Transdutor de vazão tipo turbina	Vazão água recuperador do Grupo gerador	Entrada do recuperador	PLC
Transdutor de vazão tipo turbina	Vazão água no circuito Chiller-Torre de resfriamento	Saída do Chiller	PLC
Transdutor de vazão tipo turbina	Vazão água fria na saída Chiller	Saída de água fria do Chiller	PLC
Transdutor de vazão tipo turbina	Vazão de água FanCoil	Entrada do Fan Coil da câmara	PLC
Termopar tipo J	Temperatura ambiente	Próximo entrada de ar da Microturbina	PLC
Termopar tipo J	Temperatura dos gases	Descarga da Microturbina / Fixação tipo poço	PLC
Termopar tipo J	Temperatura ambiente	Próximo entrada de ar do Motor	PLC
Termopar tipo J	Temperatura dos gases	Descarga do Motor / Fixação tipo poço	PLC
Termopar tipo J	Temperatura dos gases	Saída do recuperador de calor da Microturbina / Fixação tipo poço	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Entrada do recuperador de calor da Microturbina / soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Saída do recuperador de calor da Microturbina / Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura dos gases	Saída do recuperador de calor do Motor / Fixação tipo poço	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Entrada do recuperador de calor do Motor / Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Saída do recuperador de calor do Motor / Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Acumulador de água quente / Internamente	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Acumulador de água fria / internamente	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água: circuito Chiller-Torre de Resfriamento	Saída do Chiller/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água: circuito Chiller-Torre de Resfriamento	Entrada do Chiller	PLC

Tabela 7 – continuação

Termopar tipo J	Temperatura da água	Entrada acumulador de água quente/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Saída acumulador de água quente/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Entrada acumulador de água fria/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Saída acumulador de água fria/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Entrada do Fan Coil da câmara / Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura da água	Saída do Fan Coil da câmara/ Soldado na superfície externa do tubo	PLC
Termopar tipo J	Temperatura interna na câmara	Na câmara	PLC
Termopar tipo J	Temperatura no Split	Compressor, evaporador e condensador	Data-Logger