

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO PARA PROJETO DE PLANTAS DE
COGERAÇÃO A GÁS NATURAL**

TESE SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO
GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA

JOSÉ ALEXANDRE MATELLI

FLORIANÓPOLIS, PRIMAVERA DE 2008


SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO PARA PROJETO DE PLANTAS DE
COGERAÇÃO A GÁS NATURAL

JOSÉ ALEXANDRE MATELLI

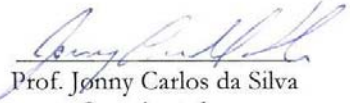
ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

DOUTOR EM ENGENHARIA

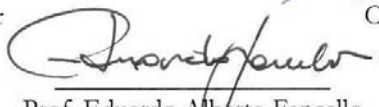
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA E APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE SANTA CATARINA



Prof. Edson Bazzo
Orientador



Prof. Jonny Carlos da Silva
Co-orientador




Prof. Eduardo Alberto Fancello
Coordenador do curso

BANCA EXAMINADORA



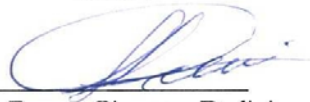
Prof. Edson Bazzo
Presidente



Prof. José Antonio Perrella Balestieri (Unesp)
Relator



Prof. Manuel Ernani de Carvalho Cruz
(UFRJ)



Prof. Franco Giuseppe Dedini
(Unicamp)



Prof. Sérgio Colle

Salve-se quem souber, porque poder, ninguém poderá mais.

Anton Walter Smetak (1913-1984)

Para Yolanda, Leticia e Valentina

AGRADECIMENTOS

Aos financiadores deste trabalho: FINEP, Petrobras e ANP, essa nas figuras do Prof. Clovis Raimundo Maliska e do Eng. Axel Dihlman;

Aos orientadores, a quem Umberto Eco diz que não se deve agradecer porque eles têm obrigação de orientar. De acordo, mas eles não têm nenhuma obrigação de *me* orientar. Por isso, agradeço ao Prof. Edson, parceiro de muitos anos, cuja capacidade de trabalho tende a infinito e tanto se esforça para manter equipes qualificadas no LabCET; e ao Prof. Jonny, parceiro mais recente, que transita fácil e naturalmente por diversas áreas da engenharia, sendo a cogeração mais uma delas;

À equipe do projeto ProSisC: M. Eng. Leonardo Mecabô, que ajudou bastante com a verificação e com os arquivos HTML; ao acadêmico Gabriel Arthur Miltzer, responsável pela interface gráfica; ao M. Eng. Eduardo Wulf Hirano e ao Eng. Marcos André Tottene, que, lá no início, deram boas idéias que perduraram até o final;

Pela entusiasmada participação, ao nosso especialista em cogeração, M. Sc. Guilherme José Binelli, verdadeiro cavalheiro, espirituoso e inteligentíssimo, que jamais se negou a compartilhar conosco qualquer de seus muitos conhecimentos;

Aos amigos do LabCET, que não sonegam auxílio recíproco, com quem aprendo bastante e que tornam nosso ambiente de trabalho agradavelmente descontraído: aos *hermanos de Colombia* Leonel, Luis e Renzo. Aos mais antigos (e engraçados) Catapan, Tales e Eduardo. Àqueles vindos de outras instituições: Lourival, Paulo, Cirilo e Fábyo. Ao Janílson, que já não trabalha mais conosco, mas com quem tive ótimas discussões sobre exergia e desempenho de plantas. Ao pessoal de apoio: Maria e seu fabuloso café; Marcos, que mantém nossa rede funcionando sem problemas há muito tempo; e Raquel, eficientíssima ao desatar os nós das atividades do dia-a-dia do lab.

Aos muitos amigos, todos. Como bons amigos, saberão compreender as omissões. Ao Fernando e ao Victor, com quem tive uma divertida banda, que nos fazia esquecer os problemas

cotidianos; ao Calil, com quem programei meu primeiro sistema especialista; ao Kupka, por me estimular a encarar os caminhos acadêmicos; e aos amigos da Itapetininga da minha natalidade, em especial Antonio Claudio e Cassiano, pela afinidade, e Alexandre e Daniel, pela longuíssima amizade de quase trinta anos.

Por fim, minha família. Letícia, com quem não vivo um relacionamento, mas uma coisa dos deuses, inventada por e (só) para eles (hemos de pagar pela profanação um dia, Lê: eu, pobre mortal, talvez com meu fígado; quanto a você, não sei o que deuses reservam de castigo para seus pares). Valentina, minha adorada filha, minha obra-prima, que se parece tanto comigo e que me faz tentar ser uma pessoa um pouco melhor. Meus sogros Antonio e Jane, sempre solícitos nas atribuições. Minha mãe Yolanda, a quem certa vez me referi como a pessoa mais forte do mundo e – hoje fica claro – não era força de expressão. Luciana, Lílíana, Silvana e Iolanda, minhas irmãs queridas, que vejo tão pouco e que queria ver mais. *Finalmente, a la cara memoria di Don Luciano, padre di marmo (di Carrara, ovvia e letteralmente), che ancora continua a forgiare il mio carattere.*

SUMÁRIO

Lista de figuras.....	x
Lista de tabelas	xiv
Simbologia.....	xvi
Resumo	xix
Abstract	xx
1. Introdução	1
1.1. Cogeração e gás natural.....	1
1.2. Projeto de plantas de cogeração.....	5
1.3. Inteligência artificial.....	7
1.4. Objetivo.....	8
1.5. Estrutura do trabalho	9
2. Sistemas baseados em conhecimento.....	10
2.1. Conceitos básicos sobre SBC's	10
2.2. Conhecimento heurístico e sua representação.....	13
2.3. Engenharia de conhecimento.....	18
2.4. Sistemas especialistas	20
2.5. Raciocínio baseado em casos.....	23

2.6.	Verificação e validação	26
2.7.	Observações finais sobre o capítulo.....	27
3.	Aquisição de conhecimento	28
3.1.	Projeto conceitual e projeto preliminar	28
3.2.	Definição das cargas	30
3.3.	Definição dos circuitos acionadores.....	33
3.4.	Definição dos circuitos de recuperação de calor	35
3.5.	Combinação dos circuitos.....	41
3.6.	Especificação dos componentes	43
3.7.	Apresentação das soluções.....	57
3.8.	Observações finais sobre o capítulo.....	58
4.	Desenvolvimento do protótipo SE.....	60
4.1.	Sistemas computacionais aplicados a projetos de sistemas térmicos	60
4.2.	Descrição do protótipo SE.....	64
4.3.	Observações finais sobre o capítulo.....	79
5.	Desenvolvimento do protótipo RBC	80
5.1.	RBC aplicados em projetos de engenharia.....	80
5.2.	Fundamentos do RBC.....	81
5.3.	Descrição do protótipo RBC.....	86

5.4. Validação	91
5.5. Considerações finais sobre o capítulo.....	92
6. Estudo de problemas e discussão	93
6.1. Problemas executados no protótipo SE	93
6.2. Problema executado no protótipo RBC	106
6.3. Integração dos protótipos SE e RBC.....	110
6.4. Considerações finais sobre o capítulo.....	112
7. Considerações finais.....	113
7.1. Contribuições.....	113
7.2. Conclusões	114
7.3. Sugestões para trabalhos futuros	115
Referências	117
Apêndice A: Taxa de energia primária.....	124
Apêndice B: Algumas regras principais	130
Apêndice C: Atributos de um caso.....	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. <i>Girarrosto</i> de Leonardo da Vinci: um registro antigo do conceito de cogeração. . 2	2
Figura 1.2. Comparação entre a eficiência (η) da geração independente de calor e energia elétrica (a) e da cogeração (b) (Educogen, 2001)..... 3	3
Figura 1.3. Ciclos de cogeração <i>topping</i> (a) e <i>bottoming</i> (b) (adaptado de Orlando, 1996). 5	5
Figura 1.4. Algumas áreas da IA (adaptado de Giarratano e Riley, 1994). 8	8
Figura 2.1. Classe <i>Componente</i> e suas subclasses. 17	17
Figura 2.2. Modelo de desenvolvimento incremental (adaptado de Gonzalez e Dankel, 1993). 20	20
Figura 2.3. Elementos básicos de um SE. 21	21
Figura 2.4. Ciclo do RBC (adaptado de Aamodt e Plaza, 1994) 24	24
Figura 3.1. Etapas de um projeto de plantas de cogeração..... 30	30
Figura 3.2. Perfil diário típico de demanda de energia elétrica..... 31	31
Figura 3.3. Perfil diário típico da carga térmica..... 32	32
Figura 3.4. Circuitos acionadores CA1 e CA2..... 33	33
Figura 3.5. Circuitos de água gelada CAG1 e CAG2..... 36	36
Figura 3.6. Circuitos de vapor CV1, CV2 e CV3. 39	39
Figura 3.7. Circuitos de água quente CAQ1 e CAQ2..... 41	41

Figura 3.8. Exemplo de diferentes soluções conceituais para um mesmo conjunto de requisitos de projeto.	43
Figura 3.9. <i>Pinch point</i> e <i>approach point</i> de uma caldeira de recuperação.....	46
Figura 3.10. Cálculo iterativo do <i>pinch point</i> , <i>approach point</i> e temperatura de saída da caldeira de recuperação.....	48
Figura 3.11. Cálculo iterativo do número de caldeiras de recuperação para os circuitos de vapor CV1 e CV3.....	49
Figura 3.12. Cálculo iterativo do número de caldeiras de recuperação e de pós-queimadores para o circuito de vapor CV2.	50
Figura 3.13. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por absorção para planta operando na base.....	52
Figura 3.14. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por absorção para planta operando na ponta.....	52
Figura 3.15. Balanço de energia em um trocador de calor.....	53
Figura 3.16. Cálculo do número de caldeiras de reserva e vazão de vapor.	55
Figura 3.17. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por compressão de reserva.....	57
Figura 4.1. Estrutura funcional do protótipo SE.	68
Figura 4.2. Representação através de orientação a objetos de uma planta.....	69
Figura 4.3. Esquema de uma regra para seleção do circuito acionador baseado em motor. 70	
Figura 4.4. Controle do fluxo de informações do protótipo SE.....	71

Figura 4.5. Janela para entrada de dados.	72
Figura 4.6. Visualização de uma solução na interface gráfica.....	73
Figura 4.7. Uma solução transcrita de um arquivo HTML.....	74
Figura 4.8. Memória de massa do Aeroporto Internacional Augusto Severo (Natal, RN)..	75
Figura 4.8. Dados da memória de massa consolidados pelo protótipo.	76
Figura 4.9. Ferramenta para estimativa da vazão de vapor.....	77
Figura 5.1. Um caso pertencente a uma base de casos.....	82
Figura 5.2. Distância entre problema e casos em um espaço 2-D.....	84
Figura 5.3. Estrutura funcional do protótipo RBC.....	87
Figura 5.4. Classe <i>Caso</i> e alguns de seus atributos.....	88
Figura 5.5. Controle do fluxo de informações do protótipo RBC.	88
Figura 5.6. Protótipo RBC: entrada de dados.....	91
Figura 5.7. Protótipo RBC: dados de saída.	91
Figura 6.1. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 1.....	94
Figura 6.2. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 2.....	96
Figura 6.3. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 3.....	100
Figura 6.4. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 4.....	104
Figura A.1. Dualidade de uma PCEAG: (a) motor; (b) refrigerador.....	125
Figura A.2. Planta baseada em máquinas de Carnot.....	126

Figura A.3. Balanço de energia da planta de Carnot.....	127
Figura A.4. Balanço de energia da planta de Carnot para $Q_c = 1000$ J.....	128
Figura A.5. PCEAG reduzida a um motor (a) e a um refrigerador (b).....	129
Figura B.1. Regra para seleção do circuito acionador baseado em turbina.	130
Figura B.2. Regra para combinação de circuitos de energia elétrica e vapor saturado.	130
Figura B.3. Regra de otimização: escolha do acionador que apresenta o melhor fator de utilização.....	131
Figura B.4. Regra de otimização: escolha da máquina de refrigeração que apresenta o melhor fator de utilização.	131

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1. Autoprodução térmica de energia elétrica: dados do BEN (Brasil, 2007).....	4
Tabela 3.1. Seleção do circuito acionador em função da carga de energia elétrica.....	34
Tabela 3.2. Heurísticas para seleção dos circuitos de água gelada.	38
Tabela 3.3. Heurísticas para seleção dos circuitos de vapor.	40
Tabela 4.1. Dados de entrada do protótipo.	66
Tabela 4.2. Evolução do protótipo SE	78
Tabela 4.3. Caso apresentado para validação.....	79
Tabela 5.1. Dados de entrada do protótipo.	90
Tabela 6.1. Requisitos de projeto do Problema 1.	93
Tabela 6.2. Soluções geradas pelo protótipo SE para o Problema 1: componentes.....	93
Tabela 6.3. Soluções geradas pelo protótipo SE para o Problema 1: desempenho.	94
Tabela 6.4. Requisitos de projeto do Problema 2.	95
Tabela 6.5. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 2: componentes....	95
Tabela 6.6. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 2: desempenho....	96
Tabela 6.7. Requisitos de projeto do Problema 3.	98
Tabela 6.8. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 3: componentes....	98
Tabela 6.9. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 3: desempenho.	99
Tabela 6.10. Requisitos de projeto do Problema 4.	103

Tabela 6.11. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 4: componentes.	103
Tabela 6.12. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 4: desempenho.	104
Tabela 6.13. Requisitos de projeto do Problema 5.	107
Tabela 6.14. Similaridade entre o problema e os casos recuperados.....	107
Tabela 6.15. Soluções dadas pelos protótipos RBC e SE para o Problema 5: componentes.	107
Tabela 6.16. Soluções dos protótipos RBC e SE para o Problema 5: desempenho.	108
Tabela 6.17. Sinergia entre as técnicas SE e RBC	110

SIMBOLOGIA

C	Consumo de energia [MWh]
C_i	Caso; Instância i de uma base de n casos [-]
COP	Coefficiente de desempenho das máquinas de refrigeração [-]
$D(t)$	Demanda instantânea de energia [kW]
\bar{D}	Demanda média de energia [kW]
L	Carga do acionador [-]
M_n	Mediana de uma série de n dados
P	Pressão do vapor [bar]
PCI	Poder calorífico inferior do combustível [kJ/kg]
T	Temperatura [°C]; Temperatura absoluta [K]
Q	Calor [kJ]
\dot{Q}	Capacidade de geração de energia térmica do componente [kW]
W	Trabalho [kJ]
\dot{W}	Potência gerada/requerida por um componente [kW]
X_j	Atributo j pertencente a um conjunto de m atributos [-]
a_i	Termos de uma série de n dados
ap	<i>Approach point</i> [°C]
\bar{c}_p	Calor específico médio [kJ/kgK]
d	Distância entre problema e caso num espaço j -dimensional [-]
h	Entalpia [kJ/kg]

- i, j Variáveis de contagem [-]
- \dot{m} Vazão mássica [kg/s]
- n Número de componentes; número de termos de uma série de dados; número de casos em uma base [-]
- pp *Pinch point* [°C]
- r Taxa de retorno de condensado; métrica de Minkowski [-]
- t Instante do período de análise de perfis de consumo de energia [h]
- w_j Peso do atributo j pertencente a um conjunto de m atributos [-]

Gregos

- Δt Período de análise de perfis de consumo de energia [h]
- α Taxa de energia primária [-]
- η Eficiência [-]
- μ Fator de utilização [-]

Subscritos

- 0 Inicial; estado de referência
- a Absorção
- ac Acionador
- ag Água gelada
- aq Água quente
- c Condensado; combustível
- cg Caldeira a gás
- cr Caldeira de recuperação
- e Entrada

<i>el</i>	Energia elétrica
<i>f</i>	Fluido frio do trocador de calor
<i>g</i>	Gases de exaustão
<i>gn</i>	Gás natural
<i>lv</i>	Vaporização
<i>max</i>	Máximo
<i>mra</i>	Máquina de refrigeração por absorção
<i>mrc</i>	Máquina de refrigeração por compressão
<i>pl</i>	Planta
<i>pq</i>	Pós-queimador
<i>q</i>	Fluido quente do trocador de calor
<i>s</i>	Saída
<i>tc</i>	Trocador de calor
<i>v</i>	Vapor saturado

Sobrescrito

- * Referente à maior recuperação de calor possível do acionador

RESUMO

Cogeração é definida como a produção simultânea de energia eletromecânica e energia térmica útil a partir de uma mesma fonte energética, permitindo assim que a energia contida no combustível seja utilizada de modo mais eficiente e racional do que a geração independente de energia elétrica e calor. Conseqüentemente, tem um forte apelo tanto do ponto de vista de eficiência, devido principalmente aos custos de combustíveis e impactos ambientais, como do ponto de vista de geração distribuída de energia, já que, dada a proximidade entre a planta e o local de consumo, dispensam-se subestações e linhas de transmissão de alta tensão. O projeto de uma planta de cogeração é um problema de síntese sujeito fundamentalmente a restrições termodinâmicas. Inclui a alocação e dimensionamento de componentes diversos, de modo a satisfazer as demandas de energia elétrica e de calor útil. Apesar de sua complexidade, é um problema que é resolvido de modo robusto por especialistas, o que sugere o uso de ferramentas de inteligência artificial (IA) para resolvê-lo computacionalmente, tais como Sistemas Especialistas (SE) e Raciocínio Baseado em Casos (RBC). No presente trabalho são desenvolvidos dois protótipos de sistemas computacionais inteligentes, baseados nas técnicas SE e RBC, respectivamente. Os protótipos são utilizados para apoio às fases de projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração, considerando cargas de energia elétrica, vapor saturado e água gelada como requisitos de projeto. Os protótipos apresentam características que não são encontradas em nenhum sistema computacional para esse domínio disponível até o momento, tais como explicação da solução (no protótipo SE) e aprendizado a partir da própria experiência (no protótipo RBC). A combinação das duas técnicas em um único protótipo é também discutida. Finalmente, o uso dos protótipos é demonstrado através da resolução de alguns casos selecionados, sendo que cada um representa um diferente conjunto de requisitos de projeto.

ABSTRACT

Cogeneration is defined as the simultaneous production of power and useful thermal energy from the same energy source, so that the fuel energy is used in a more rational and efficient way when compared to the separated production of power and heat. Thus, it has a strong appeal from both an efficiency point of view (due mainly to the fuel costs and environmental impact) and a distributed generation point of view, for the proximity between the plant and the user makes substations and transmission lines superfluous. The design of a cogeneration plant is a synthesis problem subject to thermodynamic constraints. It includes allocation and sizing of several components, such that power and useful heat demands must be satisfied. Despite its complexity, it is a problem that is robustly solved by human experts, which suggests the use of artificial intelligence (AI) tools to solve it computationally. Well known AI tools are Expert Systems (ES) and Case-Based Reasoning (CBR). In this work, two intelligent computational prototypes are developed, based on ES and CBR techniques, respectively. The prototypes are used to support the conceptual and preliminary phases of the cogeneration plant design, considering power, saturated steam and chilled water as design requirements. The prototypes present characteristics – such as solution explanation (ES prototype) and learning from previous experiences (CBR prototype) – that are not known in any of the available computational systems in this engineering domain. The combination of both ES and CBR techniques in a single prototype is discussed as well. Finally, the prototype use is shown by solving some selected cases, each case representing a different set of design requirements.

1. INTRODUÇÃO

No presente trabalho é abordado o desenvolvimento de protótipos de sistemas computacionais inteligentes capazes de projetar plantas de cogeração que utilizem gás natural como combustível. Devido à natureza fundamentalmente heurística de projetos de plantas de cogeração e à exigência de conhecimento altamente especializado envolvido nessa atividade, são utilizadas técnicas de Inteligência Artificial conhecidas por Sistemas Baseados em Conhecimento, em particular Sistemas Especialistas e Raciocínio Baseado em Casos.

Este trabalho nasce de um contexto de duas linhas de pesquisa em gás natural do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC. Uma delas é a cogeração, onde se destacam aplicações em indústrias cerâmicas (Borba, 2002) e em hospitais (Matelli, 2001), além do estudo e desenvolvimento de plantas de pequena escala (Rücker, 2004; Rossa, 2007). Outra é a linha de pesquisa em sistemas especialistas, destacando-se trabalhos sobre apoio operacional em redes de distribuição de gás natural (Castelani, 2003), detecção de vazamentos em tubulações de gás (Starr, 2006) e manutenção de turbocompressores de gás natural (Mecabô, 2007).

1.1. COGERAÇÃO E GÁS NATURAL

Cogeração é a produção simultânea de energia mecânica ou elétrica e calor útil a partir de um mesmo combustível. É um conceito muito antigo, anterior mesmo ao estabelecimento da Termodinâmica como Ciência.

Em *Il Codice Atlantico*¹, um de seus cadernos de esboços mais conhecidos, Leonardo da Vinci mostra o *girarrosto*, um espécie de forno onde o calor da combustão é utilizado para assar um alimento espetado. Os gases quentes remanescentes do cozimento são utilizados para mover as pás de uma turbina conectada a um eixo, que por sua vez move o espeto, garantindo um cozimento mais homogêneo (Figura 1.1).

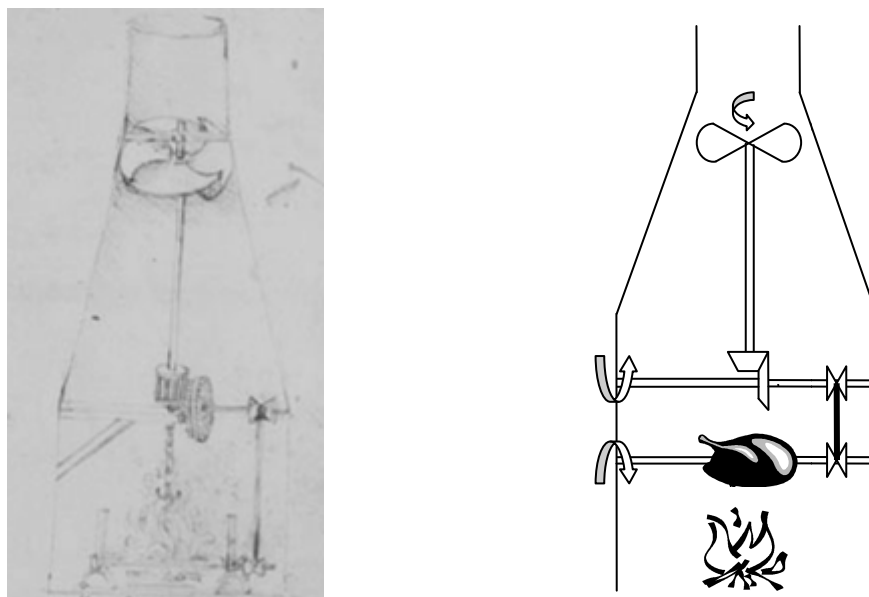


Figura 1.1. *Girarrosto* de Leonardo da Vinci: um registro antigo do conceito de cogeração.

Hoje em dia, a cogeração é uma das mais difundidas tecnologias de conservação de energia. A cogeração permite que a energia contida no combustível seja utilizada de modo mais eficiente e racional do que a geração independente de energia elétrica e calor, como ilustrado na Figura 1.2 (Educogen, 2001). Conseqüentemente, tem um forte apelo tanto do ponto de vista de eficiência, devido principalmente aos custos de combustíveis e impactos ambientais, como do ponto de vista de geração distribuída de energia, já que, dada a

¹ Leonardo da Vinci, 1452-1519. *Il Codice Atlantico* della Biblioteca Ambrosiana di Milano. Foglio 21-recto. Disponível em <http://www.ambrosiana.it/ita/ca_sfoglia.asp?sala=&pagina=22>. Acesso em: 25 julho 2006.

proximidade entre a planta e o local de consumo, dispensam-se subestações e linhas de transmissão de alta tensão.

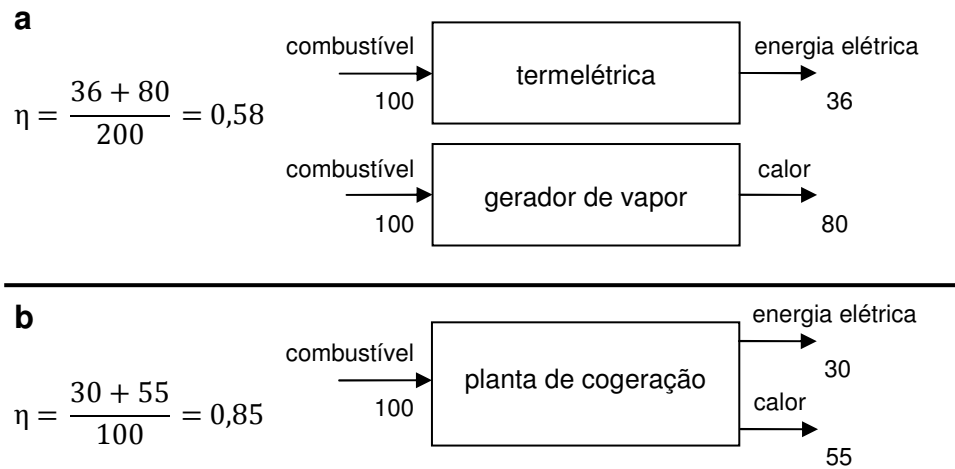


Figura 1.2. Comparação entre a eficiência (η) da geração independente de calor e energia elétrica (a) e da cogeração (b) (Educogen, 2001).

Segundo Orlando (1996), o gás natural é o combustível preferido em plantas de cogeração por que: i) é o combustível fóssil mais limpo que existe; ii) seu suprimento é confiável e seguro; iii). seu preço é competitivo. Deve-se ter em mente que esse autor se refere ao mercado de cogeração dos EUA. No Brasil, o cenário é diferente devido à grande disponibilidade de biomassa (bagaço de cana, principalmente) e aos preços do gás natural e da energia elétrica. Entretanto, pode-se notar, a partir de dados do Balanço Energético Nacional (BEN) de 2007 (Brasil, 2007) (Tabela 1.1), que o gás natural tem ganhado espaço na autoprodução de energia elétrica, apresentando o mais expressivo crescimento entre todos os combustíveis. Embora ainda longe do bagaço de cana, cuja participação é de 29%, o gás natural passou de 4% em 1994 para 18% em 2006, igualando-se com a lixívia.

Tabela 1.1. Autoprodução térmica de energia elétrica: dados do BEN (Brasil, 2007).

Combustível	1994		2006		Variação
	(GWh)	(%)	(GWh)	(%)	(%)
Derivados de petróleo	3136,1	28,7	4206,1	14,7	34,1%
Gás natural	479,2	4,4	5209,3	18,2	987,1%
Carvão	346,7	3,2	240,0	0,8	-30,8%
Biomassa	5387,0	49,3	14279,3	49,8	165,1%
Lenha	666,1	6,1	459,8	1,6	-31,0%
Lixívia	2165,7	19,8	5198,9	18,1	140,1%
Bagaço de cana	2313,7	21,2	8356,6	29,2	261,2%
Outros	241,5	2,2	264,0	0,9	9,3%
Gás industrial	1579,0	14,4	4713,3	16,5	198,5%
TOTAL	16315,0	100,0	42927,3	100,0	34,1%

Plantas de cogeração são classificadas como *topping cycle* ou *bottoming cycle*². No primeiro caso, o calor produzido pela queima do combustível é transferido para um fluido de trabalho que movimenta um acionador primário para gerar energia elétrica. Motores de combustão interna, turbinas a gás e turbinas a vapor, todos acoplados a geradores elétricos, são acionadores primários típicos. O calor remanescente, disponível a temperaturas relativamente baixas (i.e, muito menores que a temperatura da combustão), é recuperado para aplicação em algum processo (geração de vapor saturado, por exemplo). Já no *bottoming cycle*, o calor da queima do combustível é transferido para um fluido de trabalho e utilizado primeiramente em um processo de alta temperatura (fornalhas ou fornos, por exemplo). O calor restante, disponível a temperaturas relativamente altas, é geralmente recuperado para gerar vapor superaquecido para acionar uma turbina a vapor. Na Figura 1.3 são ilustrados ambos os ciclos. Note que o *girarrosto* de Leonardo da Vinci se enquadra na classificação de *bottoming cycle*.

As plantas ainda podem ser classificadas de acordo com a paridade. Se a prioridade for dada na produção de energia térmica, diz-se que a planta opera sob paridade térmica; se a prioridade for dada na produção de energia elétrica, a planta opera sob paridade elétrica. Em geral, a operação em paridade térmica implica em excedente de energia elétrica que deve ser comercializado. No entanto, a venda de excedente é uma atividade comercial que

² Pode-se encontrar esses termos traduzidos por montante elétrico e jusante elétrico, respectivamente. No entanto, por não serem termos consagrados, optou-se por não traduzi-los.

traz muitos riscos e exigências contratuais ao autoprodutor³, fazendo com que se opte, normalmente, por plantas que operem em paridade elétrica.

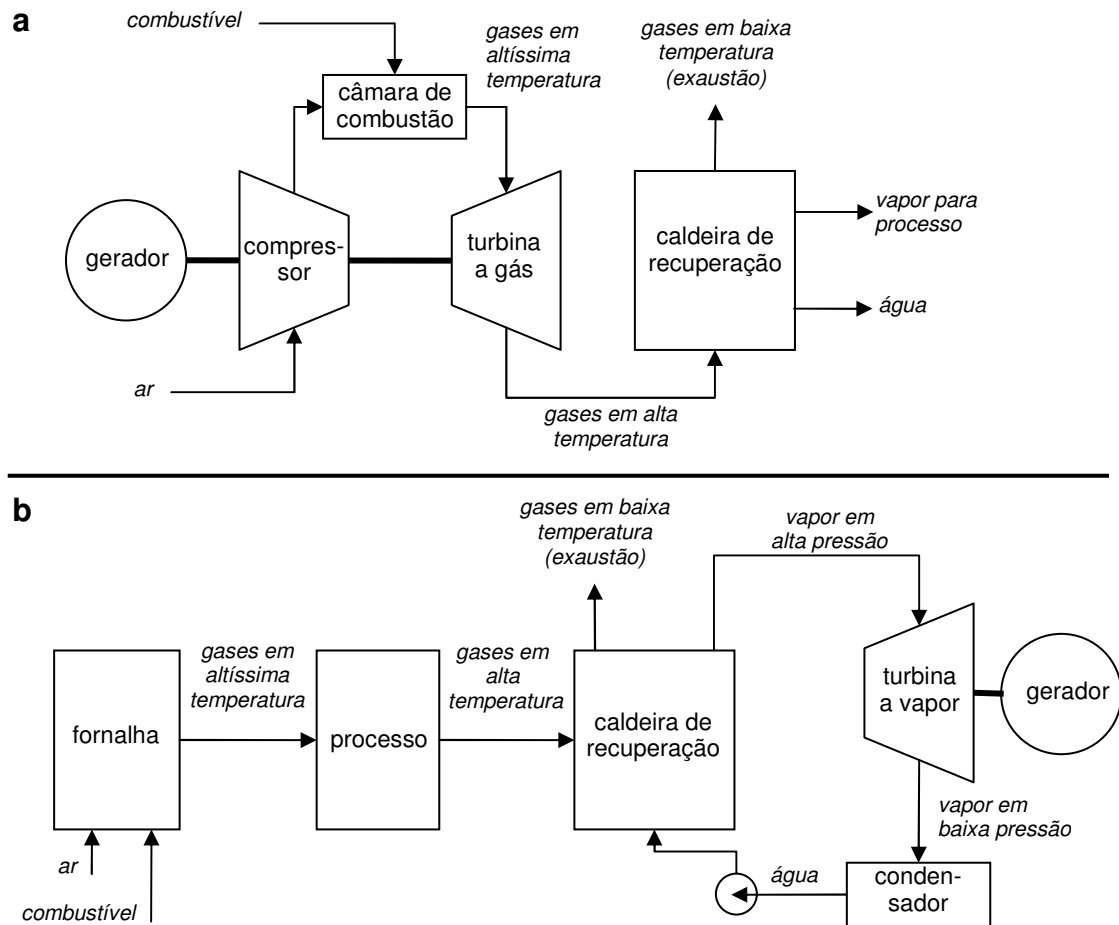


Figura 1.3. Ciclos de cogeração *topping* (a) e *bottoming* (b) (adaptado de Orlando, 1996).

1.2. PROJETO DE PLANTAS DE COGERAÇÃO

O acionador primário é o principal componente de uma planta de cogeração. Um conjunto turbo-gerador, ou turbina a gás⁴, baseia-se no ciclo Brayton e tem quatro componentes principais: compressor de ar, câmara de combustão, turbina a gás e gerador elétrico. Atualmente, são os acionadores mais utilizados em plantas de cogeração na faixa

³ No interior do estado de São Paulo, devido à disseminação de plantas movidas a bagaço de cana, algumas concessionárias têm um mercado mais amadurecido de compra de excedente de autoprodutores.

⁴ Doravante referido simplesmente como turbina.

de algumas centenas de kW até muitas centenas de MW. Um conjunto moto-gerador⁵ é composto de um motor de combustão interna a gás natural acoplado a um gerador elétrico. Baseia-se no ciclo Otto e apresenta baixo custo de aquisição, alta eficiência e uma larga faixa de aplicação (de 75 kW até 50 MW). Essas características fazem do motor a primeira opção em aplicações comerciais e residenciais, e até mesmo em setores industriais de média ou baixa tensão (Educogen, 2001).

A escolha do acionador primário é a chave de um projeto bem sucedido de uma planta de cogeração. As seguintes características são algumas que devem ser consideradas ao se escolher um motor ou uma turbina:

- a. Resposta de carga, isto é, a capacidade que o acionador tem de responder rapidamente a uma variação na carga;
- b. Facilidade de partida;
- c. Dependência do desempenho em função das condições ambientais.
- d. Disponibilidade;
- e. Confiabilidade;
- f. Custo de aquisição;
- g. Custos de operação e manutenção.

Pode-se notar que a seleção e o dimensionamento de um acionador que atenda somente a demanda de energia elétrica envolvem significativo conhecimento especializado. Quando se trata de cogeração, porém, o calor residual dos acionadores deve ser recuperado para atender as demandas térmicas, o que traz ainda mais complexidade ao projeto. De

⁵ Doravante referido simplesmente como motor.

fato, o projeto de uma planta de cogeração é um problema de síntese sujeito a restrições termodinâmicas e outras, tais com econômicas e ambientais, e que inclui a alocação e dimensionamento de componentes diversos, de modo a satisfazer as demandas de energia elétrica e de calor útil. Uma vez que plantas de cogeração tendem a se basear em ciclos cada vez mais eficientes (e freqüentemente mais complexos), há uma necessidade crescente de conhecimento especializado nesse domínio, principalmente nas fases de projeto conceitual e projeto preliminar. Apesar de sua complexidade, é um problema solucionado de modo robusto por especialistas humanos, o que sugere o uso de ferramentas de inteligência artificial para resolvê-lo computacionalmente.

1.3. INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL

Em 1956 a Inteligência Artificial (IA) foi oficialmente reconhecida como um ramo da Ciência da Computação. Desde então tem sido uma área de pesquisa polêmica e controversa, gerando desconfianças, fascínios e falsas expectativas acerca da criação de máquinas inteligentes em um curto espaço de tempo. A ficção científica certamente contribuiu para levar esse debate ao alcance do grande público, em especial através do cinema, apresentando desde obras-primas como “2001 – Uma odisséia no espaço” (1968), de Stanley Kubrick, até trabalhos menores que beiram a tolice. O enfoque dado a IA na década de 1960, no qual se buscava uma máquina baseada em conhecimento genérico capaz de resolver qualquer problema – fosse uma partida de xadrez, fosse uma prova de automática de teoremas – resultou em previsões equivocadamente otimistas. A partir da década de 1970, a abordagem da IA se tornou mais pragmática e passou a se basear em *conhecimento específico sobre determinado domínio de aplicação*, ao invés de *conhecimento genérico aplicado a diversos domínios*. Desde então a IA se estabeleceu definitivamente; técnicas e ferramentas foram criadas e extensivamente pesquisadas e algumas delas vêm encontrando espaço para aplicações em diversas outras áreas do conhecimento, como medicina, direito e engenharia.

Entre os vários ramos da IA (Figura 1.4), a técnica de Sistemas Baseados em Conhecimento (SBC) é uma solução aproximada muito bem sucedida para o problema de se programar inteligência. Nessa técnica, conhecimento humano altamente especializado é adquirido e representado de tal modo que seja possível manipulá-lo computacionalmente, reproduzindo o raciocínio do especialista. Como o projeto de plantas de cogeração é fortemente baseado em conhecimento humano, essa técnica é adequada para abordagem do problema. Sistemas Especialistas (SE) e Raciocínio Baseado em Casos (RBC) são duas das mais importantes técnicas de SBC.

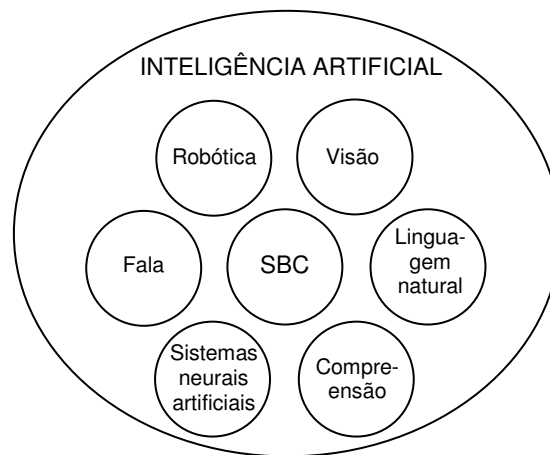


Figura 1.4. Algumas áreas da IA (adaptado de Giarratano e Riley, 1994).

1.4. OBJETIVO

O objetivo do presente trabalho é desenvolver dois protótipos de sistemas computacionais inteligentes, baseados nas técnicas SE e RBC. Os protótipos são utilizados para apoio às fases de projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração, considerando cargas de energia elétrica, vapor saturado e água gelada como requisitos de projeto. Devido às particularidades do mercado nacional de energia elétrica, consideram-se plantas de cogeração em regime *topping* e em modo de paridade elétrica. Os protótipos apresentam características que não são encontradas em nenhum sistema computacional para esse domínio disponível até o momento, tais como explicação da solução (no

protótipo SE) e geração de mais de uma solução para um mesmo conjunto de requisitos. Além disso, o protótipo RBC faz com o sistema retenha uma solução em uma base de casos para futura referência, ou seja, o protótipo aprende a partir de sua própria experiência. A combinação das duas técnicas em um único protótipo é também discutida. A abordagem combinada SE/RBC e o próprio uso do RBC são inéditos nesse domínio de conhecimento.

1.5. ESTRUTURA DO TRABALHO

Para fins de familiarização com a terminologia de IA, no capítulo 2 são revisados alguns conceitos sobre SBC, SE e RBC com base em literatura consagrada da área. O conhecimento associado às etapas de projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração é visto no capítulo 3. Esse conhecimento foi obtido principalmente através de interação com especialistas, sendo complementado por literatura especializada da área. O capítulo 4 é dedicado ao desenvolvimento de um protótipo SE, apresentando uma revisão da literatura sobre sistemas computacionais aplicados a projeto de sistemas térmicos e a descrição do protótipo. De modo semelhante, o capítulo 5 aborda o desenvolvimento de um protótipo RBC. Complementando a revisão do capítulo anterior, são revisados sistemas RBC aplicados a domínios similares ao desenvolvido no presente trabalho, já que o uso de RBC em projeto de plantas de cogeração é inédito. Os fundamentos do RBC e a implementação de um protótipo são também abordados. No capítulo 6, alguns casos selecionados são executados nos protótipos SE e RBC e a futura integração ES/RBC em um único protótipo é discutida. O trabalho se encerra com as conclusões, as principais contribuições e algumas sugestões para trabalhos futuros apresentadas no capítulo 7⁶.

⁶ Uma legenda dos componentes de uma planta e suas interconexões é apresentada em folha A3 anexa.

2. SISTEMAS BASEADOS EM CONHECIMENTO

Para fins de familiarização com a terminologia de IA, neste capítulo são revisados alguns conceitos com base em literatura da área, em particular: as principais diferenças entre a programação convencional e os Sistemas Baseados em Conhecimento; conhecimento heurístico e sua representação; engenharia de conhecimento; e aspectos básicos de Sistemas Especialistas e de Raciocínio Baseado em Casos.

2.1. CONCEITOS BÁSICOS SOBRE SBC'S

Para Gonzalez e Dankel (1993), SBC's são definidos como aqueles sistemas que refletem as habilidades que especialistas humanos possuem para resolver problemas pertencentes a um dado domínio e que, além disso, se utilizam dessas habilidades do mesmo modo que os especialistas humanos o fazem. Ainda segundo os autores, os Sistemas Baseados em Conhecimento, algumas vezes referenciados como Sistemas Especialistas, distinguem-se de algoritmos convencionais e das heurísticas de busca devido a três conceitos fundamentais:

- i. A separação do conhecimento da forma que ele é aplicado;
- ii. Uso de conhecimento altamente específico sobre certo domínio;
- iii. A natureza heurística, ao invés de algorítmica, do conhecimento empregado.

O primeiro conceito diz que a estrutura básica que manipula o conhecimento pode ser usada independentemente do domínio de aplicação. Desse conceito surgiram os *shells* para desenvolvimento de SBC's, cujas origens remontam ao início da década de 1970, quando do desenvolvimento do MYCIN na Universidade de Stanford, EUA. MYCIN foi um dos primeiros SBC's a ser construído e cujo objetivo era diagnosticar doenças sangüíneas através de um diálogo com um médico. Ao se remover do MYCIN o

conhecimento específico sobre doenças sangüíneas, restou aos pesquisadores a estrutura básica manipuladora de conhecimento. Essa estrutura era chamada de mecanismo de inferência e foi batizada de *EMYCIN*⁷. De fato, o uso do *EMYCIN* em outros domínios, tais como doenças pulmonares, análise estrutural, geologia e desenvolvimento de softwares, demonstrou que essa descoberta foi de vital importância para o desenvolvimento da tecnologia de SBC's (Bittencourt, 2001).

O segundo conceito diz que SBC's servem para resolver problemas específicos, ao contrário do que as primeiras pesquisas em IA sugeriam ao buscar um sistema genérico para resolução de problemas. O terceiro conceito surge da habilidade do ser humano, e do especialista em particular, de resolver problemas complicados sem recorrer continuamente a procedimentos ou algoritmos.

Algumas vantagens apresentadas pelos SBC's são apresentadas a seguir:

- i. Disponibilidade de conhecimento: a característica que SBC's têm de reproduzir o conhecimento de um especialista permite a distribuição dessa perícia a um custo razoável. Embora o desenvolvimento de um SBC não seja trivial, em um cenário de alta competitividade a consolidação do conhecimento tende a ser um diferencial significativo.
- ii. Facilidade de modificação: a separação do conhecimento do mecanismo de raciocínio facilita eventuais mudanças na base do conhecimento. A incorporação de conhecimento associado ao surgimento de novas tecnologias, p. ex., células-combustível (Matelli e Bazzo, 2005), torna essa característica bastante desejável.
- iii. Consistência das respostas: respostas dadas por especialistas humanos estão sujeitas a variações em função de alguns fatores, tais como fragilidade da saúde, humor,

⁷ O "E" vem de *empty*. Logo, *EMYCIN* significa, literalmente, *MYCIN* vazio.

emoções ou tensão do especialista. SBC's, por outro lado, não estão sujeitos a nenhum desses fatores, o que faz com que suas respostas não sejam sensíveis a essas variações.

- iv. Preservação e acesso permanente ao conhecimento: uma vez estabelecida a base de conhecimento, o conhecimento passa a pertencer a toda a organização e não apenas ao especialista humano, que pode se aposentar, ficar doente ou ser demitido. Além disso, SBC's provêm quase sempre acesso irrestrito, 24 horas por dia, fins de semana e feriados.
- v. Solução a partir de dados incompletos: SBC's são capazes de resolver problemas nos quais dados completos ou exatos não estão disponíveis. Esse é freqüentemente o caso em projeto de plantas de cogeração, para o qual dados sobre a demanda térmica (vapor, principalmente) são muito raramente disponíveis de modo completo.
- vi. Explicação da solução: SBC's são capazes de rastrear o conhecimento utilizado para gerar uma solução. Assim, usuários mais céticos podem se valer dessa característica para saber como as conclusões foram obtidas. Essa característica também pode ser explorada como uma segunda opinião para apoiar a decisão de um especialista humano ou como um tutor inteligente para usuários novatos.

Existem, por outro lado, desvantagens associadas a SBC's que devem ser mencionadas:

- i. Existe a possibilidade de erro nas respostas: se especialistas humanos cometem erros, é de se esperar que um SBC também os cometa. Esses erros podem custar muito caro dependendo da aplicação do SBC.

- ii. Conhecimento limitado: SBC's têm conhecimento limitado, tanto em domínio quanto em escopo. Um usuário que não esteja ciente dessas limitações pode tomar uma resposta potencialmente inconsistente do SE como válida. Especialistas humanos, ao contrário, sabem os limites de seu conhecimento e minimizam a possibilidade de suas respostas serem inconsistentes.
- iii. Senso comum: se o usuário, inadvertidamente, solicitar ao SBC uma planta de cogeração de 14 GW de potência, ele buscará uma resposta sem perceber que esta é a atual potência instalada de Itaipu (Itaipu Binacional, 2008). Embora esse seja um exemplo muito simples do ponto de vista de implementação computacional, o fato é que se esse conhecimento não for de algum modo manipulado pelo SBC, ele será ignorado. Deve-se atentar, entretanto, que o conhecimento associado ao senso comum pode ser difícil de ser representado.

2.2. CONHECIMENTO HEURÍSTICO E SUA REPRESENTAÇÃO

O conhecimento representado em um SBC é aquele que especialistas em certo domínio possuem. Um especialista é uma pessoa cujas habilidades lhe permitem concluir a partir de experiências, focalizando rapidamente o núcleo de um dado problema. Por sua vez, um não-especialista pode abordar um problema de forma sistemática e estruturada. No entanto, essa abordagem pode ser muito complicada e sujeita a erros, ou ainda requerer esforço e tempo inaceitáveis. As complicações podem decorrer de um entendimento limitado da parte do não-especialista a respeito do domínio de conhecimento e de suas relações causa-efeito.

Um especialista, por outro lado, tem maior êxito na solução de um problema, pois já adquiriu, graças à sua experiência, um conjunto valioso de relações causa-efeito, sendo capaz de usar esse conhecimento básico para rapidamente reconhecer as características

relevantes do problema, categorizá-lo de acordo com tais características e corretamente definir uma solução. As relações causa-efeito originadas a partir da experiência dos especialistas são comumente denominadas heurísticas. As heurísticas, para Gonzalez e Dankel (1993), representam conhecimento informal, ou atalhos, que permitem a um especialista rapidamente pesquisar a solução de um problema sem ter que realizar uma análise detalhada de uma situação particular, porque ou uma análise de um problema similar já foi realizada com êxito anteriormente, ou uma relação foi aprendida de uma tentativa mal sucedida de um problema similar. Cumpre ressaltar que o termo “heurística” tem outro significado em Programação Matemática. Enquanto em SBC significa conhecimento baseado em experiência, em Programação Matemática uma heurística, em contraste com algoritmos, é um procedimento que busca uma solução, sem garantir que ela será encontrada (Greenberg, 2005).

2.2.1. REGRAS

Regras são um modo bastante natural de se representar o conhecimento. Segundo Gonzalez e Dankel (1993), isso é especialmente verdadeiro para domínios nos quais o conhecimento vem se acumulando ao longo do tempo e que resultou em associações empíricas internas – as heurísticas. As regras são uma estrutura do tipo SE-ENTÃO. A parte associada ao SE é uma condição (ou premissa ou ainda antecedente) que testa o valor de verdade de um conjunto de fatos. Caso esse conjunto seja verdadeiro, a parte associada ao ENTÃO da regra (chamada ação, conclusão ou consequência) infere um novo conjunto de fatos. O exemplo a seguir ilustra esse conceito:

SE (carga é intermitente)

ENTÃO (acionador selecionado é motor)

A representação do conhecimento através de regras é largamente utilizada, devido à sua característica de representar conhecimento heurístico, além de ser relativamente fácil de

entender. Cabe notar que um novo conjunto de fatos derivados de uma regra pode ser utilizado como condição de uma nova regra, o que se chama de encadeamento:

SE (acionador selecionado é motor)
ENTÃO (calor da água das camisas é disponível)

O encadeamento entre as regras se sucede até que uma conclusão seja obtida. Assim, a resolução de problemas através de um SBC consiste em criar uma série de inferências que estabelece um caminho entre a definição do problema e sua solução. Esse processo é chamado de cadeia de inferência. Embora o exemplo apresentado seja simples e resolvido pelas regras de inferência da lógica clássica (encontrada em programas convencionais), a elaboração de um conjunto de regras baseado em conhecimento heurístico que resulte em um encadeamento coerente não é trivial. Diferentemente da lógica clássica, tal encadeamento é um processo geralmente baseado em lógicas não-monotônicas, que é uma extensão da lógica clássica. Considere, por exemplo, o seguinte conjunto de axiomas:

(acionadores atendem a carga requisitada)
(turbina é um acionador)

Através da lógica clássica, infere-se a conclusão (turbina atende a carga requisitada), que passa a fazer parte do conjunto de axiomas. Infere-se também, a partir da conclusão anterior, a conclusão (pós-queima é possível). Entretanto, se um novo fato (carga requisitada é intermitente) passar a fazer parte do conjunto de axiomas, a conclusão de que a turbina atende a essa carga, bem como quaisquer outras conclusões dela derivadas, devem ser invalidadas⁸. As regras de inferência da lógica clássica, porém, não permitem invalidações, porque seus axiomas são sempre verdadeiros e não podem ter seu valor de verdade modificado nem podem ser removidos do conjunto de axiomas. Logo, o conjunto

⁸ Ver seção 3.3.

de axiomas sempre aumenta. Diz-se então que a lógica clássica é monotônica. Lógicas não-monotônicas, por outro lado, admitem inferências realizadas na ausência de informações contrárias, mas que podem ser invalidadas na presença dessas informações (Bittencourt, 2001). Assim, o conjunto de axiomas

(acionadores atendem a carga requisitada)
 (turbina é um acionador)
 (turbina atende a uma carga requisitada)
 (pós-queima é possível)

só é verdadeiro na ausência do fato (*carga requisitada é intermitente*). A existência desse fato invalida o fato (*turbina atende a carga requisitada*) e a conclusão (*pós-queima é possível*) dele derivada, e devem ser removidos do conjunto de axiomas para que este continue verdadeiro. As ferramentas de implementação de SE's são capazes de manipular lógicas não-monotônicas, além de garantir que eventuais conclusões posteriores baseadas em um fato que tenha sido removido sejam também removidas.

2.2.1. ORIENTAÇÃO A OBJETOS

Segundo Dym e Levitt (1991), regras não são poderosas o suficiente para representar o conhecimento associado a problemas de síntese, porque elas não permitem uma adequada representação das informações (dados) associadas a entidades reais (p. ex., caldeiras) desses problemas. Gonzales e Dankel (1993) definem um *objeto* como uma coleção de informações que representam uma entidade do problema e que contém a descrição de como essas informações são manipuladas. Uma *classe* define o comportamento dos objetos, através de *procedimentos*, e quais estados ele é capaz de manter, através de *atributos*.

Um objeto é, portanto, uma abstração de alguma entidade do mundo real descrita por uma coleção de atributos e de procedimentos. Cada uma dessas entidades é representada através de uma classe. Um objeto específico dessa classe é uma *instância* dela. Na Figura 2.1

é mostrado como alguns atributos e procedimentos são organizados através do conceito de classes. Por simplicidade, já que o sistema é modelado em várias classes, apresenta-se somente a classe *Componente* com ênfase em suas subclasses *Caldeira*. Alguns atributos da classe *Caldeira*, como cor e tipo de queimador, são irrelevantes para o problema proposto e são ignorados. A escolha dos atributos que são relevantes para o problema e que modelam a entidade adequadamente é o que se conhece por abstração.

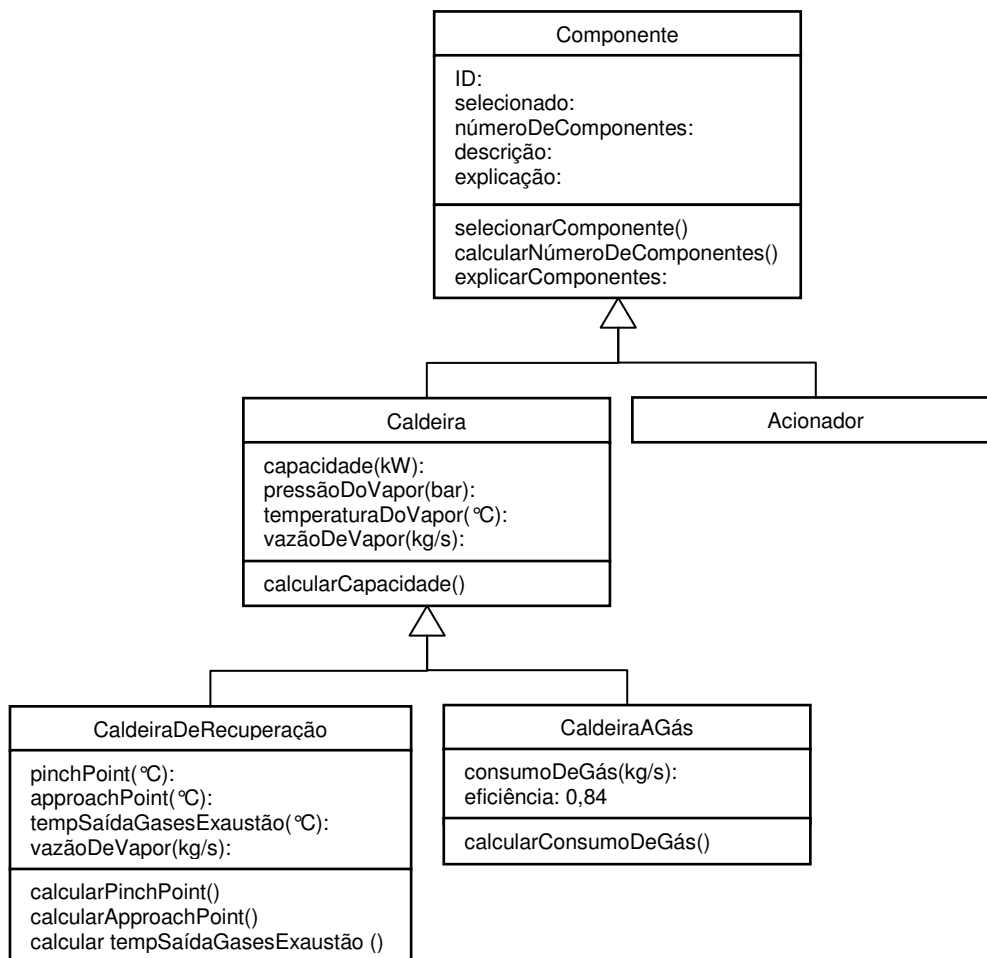


Figura 2.1. Classe *Componente* e suas subclasses.

Dizer que *CaldeiraDeRecuperação* e *CaldeiraAGás* são subclasses de *Caldeira* significa dizer que esses componentes compartilham certos atributos e procedimentos, mas não todos. Os atributos e procedimentos que as subclasses compartilham são herdados da classe superior. Por exemplo, tanto caldeiras de recuperação como caldeiras a gás possuem um atributo

pressão do vapor (herdado da classe *Caldeira*), mas somente caldeiras de recuperação possuem o atributo *pinchpoint*⁹. Os atributos e procedimentos da classe *Componente* são herdados também por todas as suas subclasses. Assim, o procedimento *calcularNúmeroDeComponentes()*, por exemplo, é utilizado para determinar quantos deste componente são necessários na planta. No entanto, os procedimentos dependem do componente escolhido. O cálculo do número de caldeiras de recuperação (ver Figura 3.11) é diferente do cálculo do número de caldeiras a gás (ver Figura 3.16). Em orientação a objetos, essas diferentes formas que o procedimento herdado pode assumir é o que se chama de polimorfismo. Os procedimentos são encapsulados, ou seja, são válidos apenas no contexto da classe em que estão definidos, o que contribui para facilitar o gerenciamento e eventuais expansões do código.

2.3. ENGENHARIA DE CONHECIMENTO

O desenvolvimento de SBC's é muito diferente do de programas convencionais. Enquanto os requisitos dos últimos são bem definidos, não é esse o caso de SBC's, pois o conhecimento de um especialista humano é difícil de definir e ainda mais difícil de explicitar. É, portanto, incumbência do responsável pelo desenvolvimento do SBC manter contato estreito com o(s) especialista(s) ao longo do processo. É justamente esse contato constante que distingue o desenvolvimento de SBC's e programas convencionais. Isso implica que o pessoal envolvido no desenvolvimento de SBC's deve possuir habilidades ou qualidades que transcendem (mas não excluem) o puro conhecimento de programação, tais como facilidade de relacionamento, articulação, paciência, entre outras.

⁹ Em verdade, toda caldeira possui esse atributo, mas na representação do conhecimento adotada no presente trabalho optou-se por atribuí-lo somente às caldeiras de recuperação, do mesmo modo que se atribui eficiência somente às caldeiras a gás.

Do mesmo modo que o responsável pelo desenvolvimento de programas convencionais é conhecido por engenheiro de software, o responsável pelo desenvolvimento de SBC's é conhecido por engenheiro de conhecimento e o processo de desenvolvimento de SBC's é conhecido por engenharia de conhecimento. Gonzalez e Dankel (1993) definem a engenharia de conhecimento como “a aquisição de conhecimento em determinado domínio a partir de uma ou mais fontes não-eletrônicas e sua conversão para uma forma que possa ser utilizada por um computador para resolver problemas que tipicamente só podem ser resolvidos por pessoas que detenham extensivo conhecimento sobre o domínio em questão”. A engenharia de conhecimento envolve também a percepção de qual conhecimento está sendo utilizado para resolver um problema, categorizar esse conhecimento e determinar o melhor modo de representá-lo.

O modelo de desenvolvimento de SBC's, conhecido como modelo incremental, é diferente dos modelos de desenvolvimento de sistemas convencionais. Esse modelo é centrado em duas etapas principais (Gonzalez e Dankel, 1993):

- i. Eleger uma parte do conhecimento para ser desenvolvida de modo completo, gerando-se um protótipo inicial a partir do qual o sistema é desenvolvido;
- ii. Acrescentar iterativamente ao protótipo as demais partes do conhecimento.

A aplicação desse modelo de desenvolvimento envolve, portanto, vários ciclos de aquisição, representação, implementação e validação do conhecimento (Figura 2.2). A grande vantagem dessa abordagem é que se permite que o SBC seja colocado em uso mesmo sem estar completo. Programas convencionais, por outro lado, geralmente devem estar completamente implementados antes de ser colocados em uso. O modelo incremental é adotado no presente trabalho. Entretanto, os ciclos de aquisição, representação, implementação e validação são observados apenas no desenvolvimento do protótipo SE, já que o protótipo RBC atingiu apenas a fase de protótipo inicial.

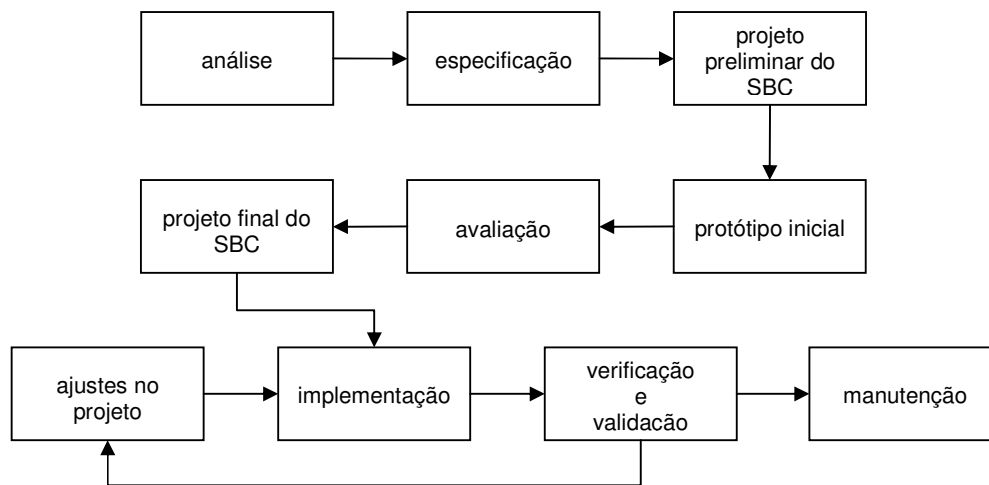


Figura 2.2. Modelo de desenvolvimento incremental (adaptado de Gonzalez e Dankel, 1993).

2.4. SISTEMAS ESPECIALISTAS

SE é a mais difundida técnica de SBC. Giarratano e Riley (1994) apresentam uma definição de SE como um programa de computador inteligente, que utiliza conhecimento e métodos de inferência para resolver problemas difíceis o suficiente para requerer significativo conhecimento especializado ou perícia de um ser humano. Em outras palavras,

o programa emula¹⁰ a habilidade que um especialista humano tem ao tomar decisões. Os elementos básicos de um SE são mostrados na Figura 2.3.

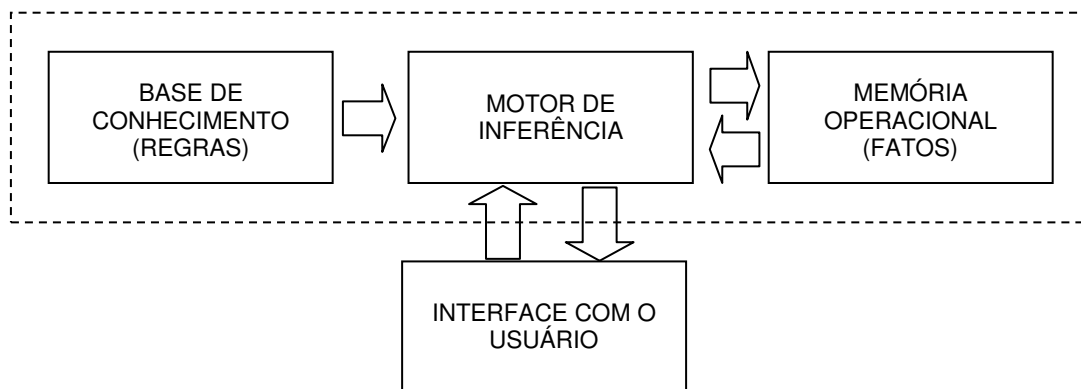


Figura 2.3. Elementos básicos de um SE.

Na base de conhecimento, parte do conhecimento do especialista humano, após ter sido adquirido e adequadamente representado, é armazenado permanentemente, em geral sob a forma de regras. O motor (ou máquina) de inferência é o mecanismo de controle que avalia e aplica as regras contidas na base de conhecimento a partir das informações contidas na memória operacional (ou de trabalho). As informações ali contidas são denominadas de fatos e, ao contrário das informações contidas na base de conhecimento, são de caráter volátil.

A concepção da tecnologia SE tem como base a teoria cognitiva de Newell e Simon (1963) *apud* Giarratano e Riley (1994). De acordo com essa teoria, um especialista humano, ao se confrontar com um problema, organiza partes do conhecimento de forma flexível através de conexões com outras partes. Uma regra corresponde a um pequeno módulo desse conhecimento. Esse conhecimento, de natureza permanente, representa uma memória de longo prazo. Na busca de uma solução, um módulo do conhecimento é ativado (ou estimulado) e desencadeia a ativação de outros módulos. Para que esse

¹⁰ Emular, v. Tr. ind. 2. Empenhar-se na mesma pretensão. (Borba, F. S. Dicionário da Língua Portuguesa. 1ª ed. São Paulo: Melhoramentos, 1988. 1v.).

processo ocorra, é necessária a existência de um processador cognitivo, cujo papel é determinar quais regras serão ativadas por um dado conjunto de estímulos. Esse conjunto de estímulos corresponde a uma memória de curto prazo, dada a natureza temporária dos estímulos. Em um SE, a memória operacional corresponde à memória de curto prazo do especialista e os fatos correspondem aos estímulos; a base de conhecimento corresponde à memória de longo prazo, e as regras correspondem a pequenos módulos do conhecimento; finalmente, o motor de inferência corresponde ao processador cognitivo.

O raciocínio associado ao SE está fortemente ligado à cadeia de inferência. Problemas de síntese, tais como projetar uma planta de cogeração, apresentam uma cadeia de inferência em que se parte de dados conhecidos para se chegar a certa conclusão. A cadeia de inferência, nesse caso, apresenta encadeamento direto. Por outro lado, problemas de análise, tais como diagnósticos, apresentam uma cadeia de inferência em que se parte de uma possível conclusão e se tenta provar sua validade através de dados que suportem sua evidência. Nesse caso, a cadeia de inferência apresenta encadeamento reverso. Esses conceitos são importantes e devem ser levados em conta para uma adequada seleção das ferramentas de implementação.

De acordo com Bittencourt (2001), o surgimento dos primeiros SE's no final da década de 1970 marca o amadurecimento definitivo da IA, permitindo finalmente que sistemas computacionais tivessem desempenho intelectual, em domínios restritos, equivalente ao de um ser humano adulto. Hoje em dia, existem milhares de SE's em operação nos mais variados domínios e diversas ferramentas de implementação – os *shells* – estão disponíveis com alto grau de confiabilidade e desenvolvimento. A maior vantagem de se utilizar um *shell* é a de permitir que o engenheiro de conhecimento se concentre na construção da base de conhecimento, além de tornar desnecessária a laboriosa e altamente técnica programação do motor de inferência. De fato, Bittencourt (2001) observa que os

shells são considerados como parte de uma tecnologia de desenvolvimento de software estabelecida, sendo objeto de diversas conferências internacionais e submetida a avaliações rigorosas de desempenho. Por outro lado, a escolha de um *shell* deve ser feita de maneira criteriosa, a fim de assegurar que seja o mais adequado para determinada aplicação.

2.5. RACIOCÍNIO BASEADO EM CASOS

Assim como Sistemas Especialistas, o Raciocínio Baseado em Casos é uma técnica de SBC. No entanto, enquanto a base de conhecimento do SE contém fundamentalmente regras, a base de conhecimento do RBC é constituída fundamentalmente de casos. Para Wangenheim e Wangenheim (2003), RBC é uma abordagem computacional para a solução de problemas e para o aprendizado com base em experiências passadas, ou, de forma mais simplificada, a solução de novos problemas por meio da utilização de casos anteriores já conhecidos. Para Aamodt e Plaza (1994), RBC é também uma abordagem para aprendizado incremental e sustentável, uma vez que uma nova experiência é retida cada vez que um novo problema é resolvido, tornando-a imediatamente disponível para problemas futuros.

Na Figura 2.4 é apresentado o ciclo do RBC proposto por Aamodt e Plaza (1994). A descrição inicial de um problema define um novo caso, o qual é utilizado para recuperar um ou mais casos de uma coleção de casos anteriores (recuperação). O caso recuperado é combinado com o novo para gerar um caso resolvido, i.e, uma solução proposta para o problema inicial (reutilização). Essa solução é testada – seja através de sua aplicação no mundo real, seja através da avaliação de um especialista – e reparada caso não tenha obtido sucesso (revisão). Finalmente, a experiência útil é armazenada para uso futuro e a base de casos é atualizada por um novo caso aprendido, ou pela modificação de alguns casos existentes (retenção). Como indicado na Figura 2.4, o conhecimento genérico sobre o domínio apóia todo o ciclo, sendo que esse suporte pode ser inexistente ou crucial,

dependendo do método utilizado. Um conjunto de regras pode fazer o papel do conhecimento genérico sobre o domínio.

Segundo Wangenheim e Wangenheim (2003), essa é, comumente, a forma como especialistas humanos processam conhecimento baseado em casos: o especialista recorda-se de uma solução anterior elaborada por ele mesmo e tenta aplicá-la a um problema atual semelhante, sem passar pelo demorado e complexo processo de elaborar uma nova solução passo-a-passo a partir do zero. Assim, RBC pode funcionar inclusive como um modelo cognitivo para se entender alguns aspectos do pensamento e comportamento humano. De fato, uma das características do RBC é que ele se utiliza, através de mimetismo¹¹, da forma como as pessoas relembram de muitas soluções de problemas.

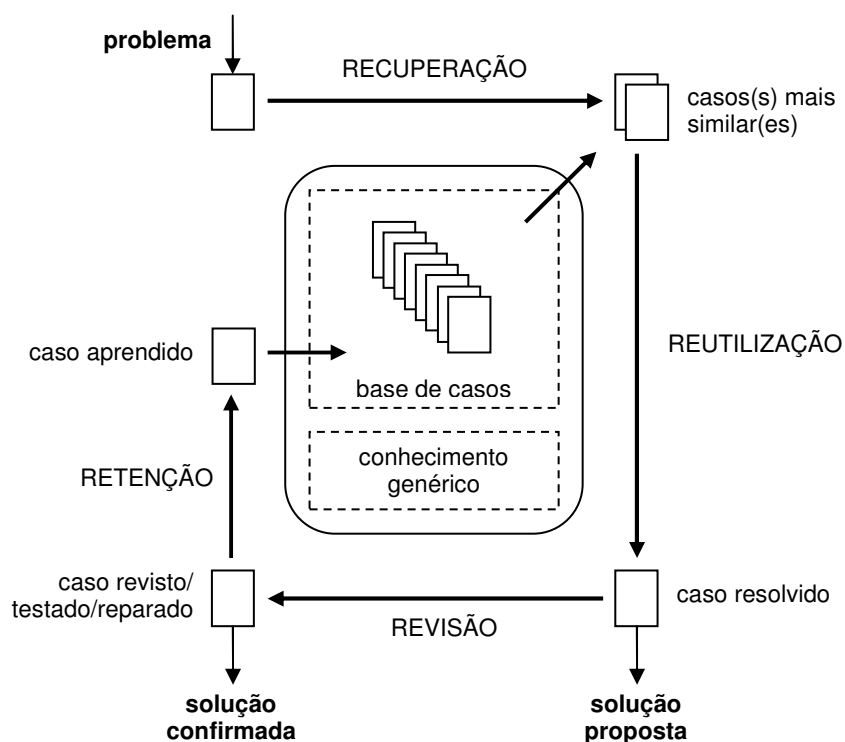


Figura 2.4. Ciclo do RBC (adaptado de Aamodt e Plaza, 1994)

¹¹ Mimetismo, s. m. 1. Capacidade que têm certos animais e plantas de adaptar-se à cor do ambiente ou de outros seres ou objetos, para passarem despercebidos de seus inimigos ou vítimas. 2. Mania de imitação. (Borba, F. S. Dicionário da Língua Portuguesa. 1ª ed. São Paulo: Melhoramentos, 1988. 1v.)

Alguns aspectos cognitivos do RBC são encontrados no trabalho de Schank e Abelson (1977). Os autores propuseram que nosso conhecimento genérico sobre situações é registrado na forma de roteiros, o que nos permite criar expectativas sobre resultados e inferir sobre relacionamentos causais entre ações. Roteiros são propostos como uma estrutura de memória conceitual, que descrevem informações sobre eventos estereotipados (ir ao restaurante, por exemplo). A hipótese cognitiva por trás dos roteiros é a de que nós armazenamos informações sobre conjuntos abstratos de ações em bloco, e também nos lembramos deles como uma unidade, escolhendo o roteiro adequado para cada situação típica. No entanto, experimentos mostraram que o modelo de roteiros não forma uma teoria completa sobre representação de memória, já que as pessoas freqüentemente se confundem em eventos que apresentam roteiros similares. Schank (1982) continuou a explorar o papel da memória de situações prévias e dos pacotes de organização de memória (POM's) tanto na resolução de problemas como no aprendizado de situações. A teoria dos POM's postula que a compreensão e a lembrança de situações, bem como seu aprendizado e abstração, são processos mentais fortemente ligados. Episódios vividos são registrados na memória preferencialmente quando ocorrem de um modo que inesperado. Ao mesmo tempo, Gentner (1983) *apud* Watson e Marir (1994) desenvolveu um quadro teórico importante para RBC sobre raciocínio analógico, no qual ocorre a transformação e extensão do conhecimento proveniente de certo domínio para outro ainda não completamente compreendido. Entretanto, segundo Wangenheim e Wangenheim (2003), em RBC são resolvidos problemas exclusivamente no âmbito de um mesmo domínio de aplicação.

Tal como SE, diversos *shells* estão disponíveis acadêmica e comercialmente. Do ponto de vista comercial, sistemas baseados em casos estão vivendo uma expansão rápida, encontrando um número crescente de aplicações, tendo sido utilizado em diversos domínios de aplicação, entre elas o projeto auxiliado por computador (p. ex., Kraslawski et

al., 1995; Avramenko et al., 2004; Avramenko e Kraslawski, 2006). A popularidade do RBC se dá pela facilidade de projeto e implementação, oferecendo ao usuário capacidade para se deduzir e justificar de forma convincente as decisões e ações tomadas, além da criação de aplicações com baixo esforço e custo quando comparado a outras técnicas de IA.

2.6. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

Nessa etapa do desenvolvimento de SBC's, procura-se assegurar a qualidade do sistema, ou seja, que esteja tão livre de erros quanto possível. Em SBC's as principais causas de erros são i) a ausência de especificação do sistema; ii) erros semânticos ou de sintaxe introduzidos durante a implementação; iii) representação incorreta do conhecimento, resultando em soluções errôneas ou incapacidade de encontrar soluções.

A verificação trata das duas primeiras causas e é responsabilidade do engenheiro de conhecimento. A validação trata de todas as causas citadas e, mais importante, visa assegurar que o conhecimento sobre o domínio é correto e que o sistema resolve problemas desse domínio de modo correto e preciso. A validação é de responsabilidade do especialista, que testa o desempenho e a utilidade do protótipo e apóia o engenheiro do conhecimento em sua correção, garantindo assim que as respostas e explicações apresentadas pelo SBC sejam coerentes com as do especialista. Apesar da simplicidade conceitual, qualquer tentativa de se enfatizar a importância da verificação e validação seria supérflua. A literatura sobre o tema é vasta e dá uma medida da importância dessa fase no desenvolvimento de SBC's em geral. Gonzalez e Dankel (1993) dedicam um capítulo inteiro para esse tema em seu trabalho, enfatizando as diferenças entre verificação e validação e apresentando os erros mais comuns, tanto semânticos como os não-semânticos, bem como apresentando metodologias para essa fase. O periódico *Knowledge-Based Systems* dedicou, em 1999, duas edições sobre o tema (Plant e Antoniou, 1999), contendo seis

artigos no total. A metodologia de verificação e validação adotada no presente trabalho é abordada mais especificamente no capítulo 4.

2.7. OBSERVAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foram revisados alguns conceitos fundamentais sobre os Sistemas Baseados em Conhecimento, enfatizando-se as principais diferenças entre a programação convencional e os Sistemas Baseados em Conhecimento, e a representação de conhecimento heurístico através de regras e orientação a objetos. Aspectos básicos de Sistemas Especialistas e de Raciocínio Baseado em Casos foram também abordados. No próximo capítulo se apresenta o conhecimento associado ao projeto de plantas de cogeração a gás natural, adquirido a partir de interação com especialistas da área.

3. AQUISIÇÃO DE CONHECIMENTO

Neste capítulo é apresentada a aquisição de conhecimento e a aplicação de conceitos de metodologia de projeto para se avaliar as concepções tecnicamente viáveis de uma planta de cogeração. O conhecimento associado ao projeto de plantas de cogeração a gás natural é também apresentado e registrado. Esse conhecimento foi obtido principalmente através de interação com especialistas, sendo complementado por literatura especializada da área. Os conhecimentos mais importantes advindos da interação com os especialistas são destacados em itálico ao longo do texto.

3.1. PROJETO CONCEITUAL E PROJETO PRELIMINAR

O projeto de uma planta de cogeração é um problema de síntese sujeito a restrições termodinâmicas. Inclui a alocação e dimensionamento de componentes de modo a satisfazer cargas térmicas e elétricas. Em metodologia de projetos, divide-se a atividade de projeto de um produto qualquer em quatro fases principais (Pahl et al., 2007), resumidamente descritas a seguir:

- i. Clarificação das tarefas: o propósito dessa fase é coletar informações sobre os requisitos que devem ser preenchidos pela planta, bem como as restrições existentes e sua importância. O resultado dessa fase é a especificação de informações;
- ii. Projeto conceitual: nessa fase se determinam um ou mais princípios de solução que atendam às especificações de informações levantadas na fase anterior. Os problemas essenciais são abstraídos, buscando-se princípios funcionais adequados ao problema e combinando-os em estruturas funcionais. O resultado dessa fase é a especificação de um princípio de solução. A representação do princípio de solução

pode assumir várias formas, desde fluxogramas até diagramas de circuitos. É a fase que exige mais criatividade e conhecimento especializado;

- iii. Projeto preliminar: a partir de um princípio de solução, nessa fase se gera uma solução técnica que possa ser executada de fato. Essa solução é progressivamente elaborada até que seja possível avaliar economicamente o projeto. As decisões aqui tomadas devem ser, tanto quanto possível, justificadas matematicamente e fisicamente. O resultado dessa fase é a especificação de uma configuração.
- iv. Projeto detalhado: nessa etapa, são geradas as especificações dos materiais, as estimativas de custo e toda a documentação (desenhos, plantas etc) necessária para que o projeto seja executado. O resultado dessa fase é a especificação de execução.

Por ser a fase que mais demanda criatividade e conhecimento, o projeto conceitual é onde a aplicação de sistemas computacionais é menos difundida. De fato, Klein (1992) *apud* Almeida (2000) afirma que, dentro do processo de projeto acima descrito, a aplicação de computadores no sentido inverso do desenvolvimento das fases, sendo mais difundida na fase de projeto detalhado.

A aplicação de conceitos de metodologia de projeto para se avaliar as concepções tecnicamente viáveis de uma planta de cogeração é mostrada na Figura 3.1. A etapa 1 corresponde à fase de clarificação de idéias; as etapas 2, 3 e 4 correspondem ao projeto conceitual; e as etapas 5 e 6 abordam alguns aspectos da fase de projeto preliminar. Cada uma dessas etapas é detalhada a seguir.

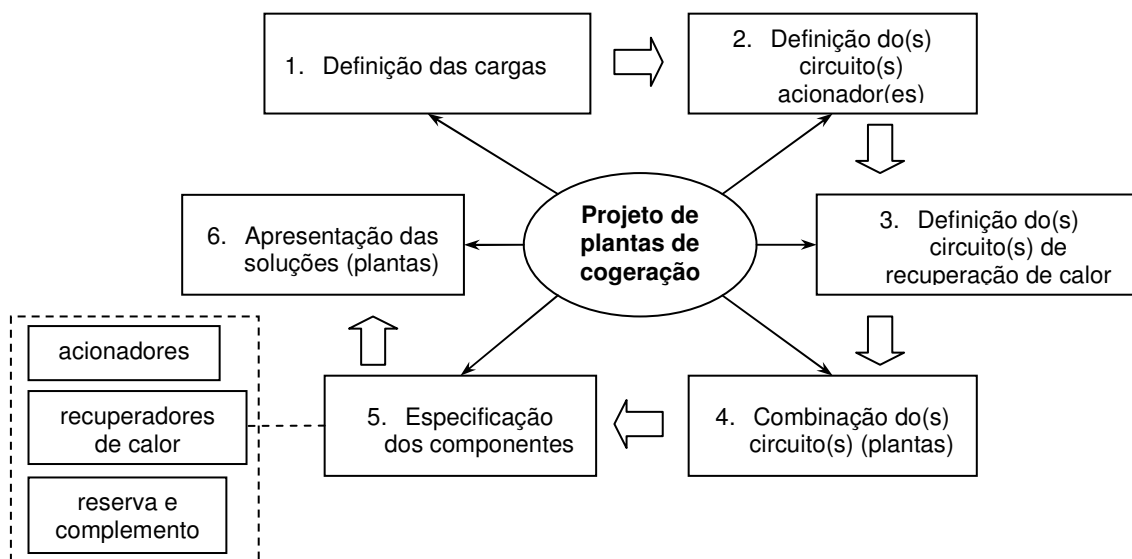


Figura 3.1. Etapas de um projeto de plantas de cogeração.

3.2. DEFINIÇÃO DAS CARGAS

Aqui é definida a existência das cargas térmicas (pressupõe-se que a carga de energia elétrica sempre exista) e especificados alguns atributos quantitativos das cargas existentes. Primeiramente, é informado o regime de operação da planta: 24 h/dia, 7 dias/semana (base) ou 3 h/dia, 5 dias/semana (ponta). Informações sobre a magnitude da carga de energia elétrica podem ser estimadas ou precisamente calculadas a partir da memória de massa¹² do cliente. São então definidas a demanda máxima e mínima e o consumo diário de energia elétrica para o intervalo de tempo definido no regime de operação. O consumo de energia elétrica e a demanda média de energia elétrica são calculados de acordo com as Eqs. 3.1a e 3.1b, respectivamente. Na Figura 3.2 é mostrado um perfil diário típico de demanda de energia elétrica.

¹² Registro feito pela concessionária de energia elétrica das medidas de demanda do cliente, tipicamente a cada 15 minutos.

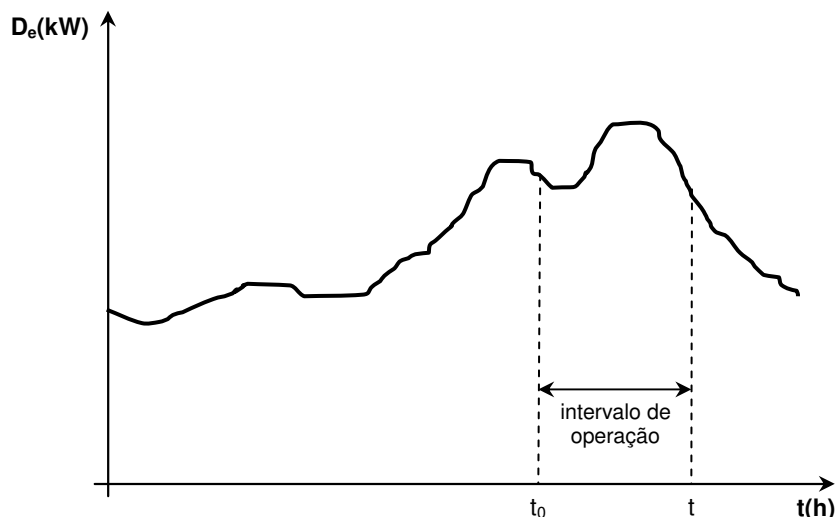


Figura 3.2. Perfil diário típico de demanda de energia elétrica.

$$C_e = \int_{t_0}^t D_e(t) dt \quad (3.1a)$$

$$\bar{D}_e = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t D_e(t) dt \quad (3.1b)$$

Para a carga de vapor saturado, os atributos desconhecidos podem ser redefinidos de acordo com algum conhecimento específico (vazão de vapor, taxa de retorno de condensado e temperatura do condensado). Por exemplo, se a taxa de retorno de condensado não for conhecida, *sugere-se 80% com a justificativa que esse é um valor tipicamente encontrado na maioria das aplicações de vapor*. Embora simples, pode-se notar que esse exemplo tem relação com a capacidade que o protótipo deve ter de manipular dados desconhecidos e de apresentar explicações. O exemplo também indica que raciocínios mais complexos podem ser modelados. A demanda de vapor é calculada de acordo com a Eq. 3.2, sendo que a pressão é limitada na faixa de 6 a 20 bar (0,6 a 2 MPa).

$$D_v = \dot{m}_v [h_v(P) - r h(P, T_c) - (1 - r) h(P, T_0)] \quad (3.2)$$

Com relação à carga de água gelada, a demanda é a própria carga térmica da construção, que pode ser estimada a partir das instalações existentes ou, mais precisamente, definida a partir do perfil diário de carga térmica, como mostrado na Figura 3.3. Desse perfil, calcula-se o consumo diário (Eq. 3.3a) e a demanda média de água gelada (Eq. 3.3b). Os limites de integração dessas equações não precisam ser iguais aos limites das Eqs. 3.1.

$$C_{ag} = \int_{t_0}^t D_{ag}(t) dt \quad (3.3a)$$

$$\bar{D}_{ag} = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^t D_{ag}(t) dt \quad (3.3b)$$

A água gelada é uma utilidade que pode ser acumulada em reservatórios para ser utilizada quando for necessário, o que é conhecido por termoacumulação. *A termoacumulação é altamente desejável, pois permite uma operação mais flexível da planta, já que os perfis de demanda de energia elétrica e de água gelada não precisam ser acoplados.* Além disso, as máquinas de refrigeração não são dimensionadas para atender a carga térmica máxima, o que garante maior aproveitamento da potência de refrigeração instalada.

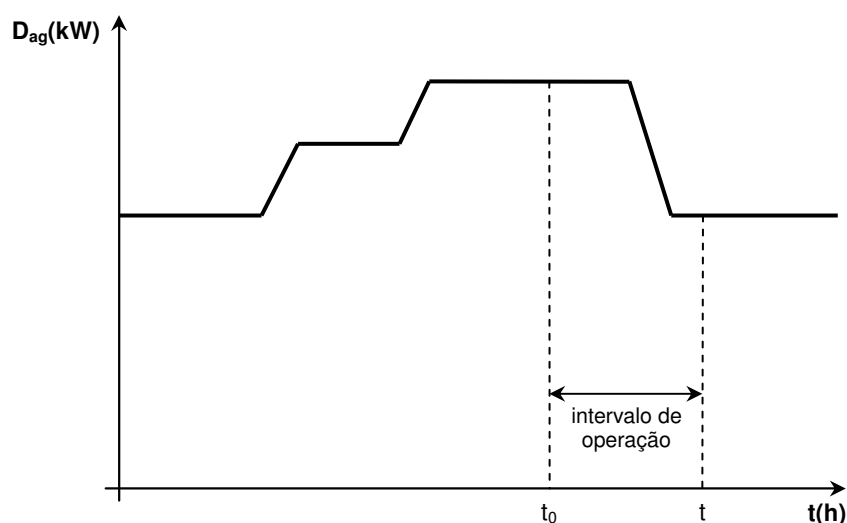


Figura 3.3. Perfil diário típico da carga térmica.

3.3. DEFINIÇÃO DOS CIRCUITOS ACIONADORES

Assim como outros sistemas mecânicos, uma planta de cogeração pode ser modelada como um conjunto de circuitos, cada um com uma função específica: atender uma carga ou fornecer energia para outro circuito. Um circuito, por sua vez, é uma coleção de componentes interligados para realizar essa função.

O circuito acionador é aquele composto por acionadores primários acoplados a geradores. Sua função é, naturalmente, gerar energia elétrica. Os circuitos acionadores são mostrados na Figura 3.4 e descritos a seguir:

CA1: CircuitoAcionador1, composto de motores acoplados a geradores;

CA2: CircuitoAcionador2, composto de turbinas acopladas a geradores.

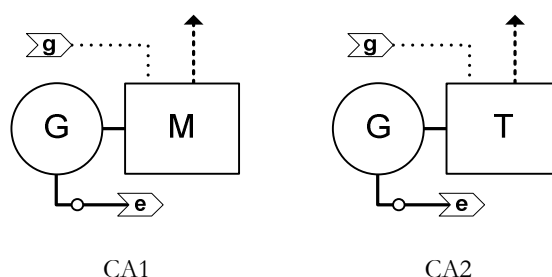


Figura 3.4. Circuitos acionadores CA1 e CA2.

O regime de operação é o primeiro fator a ser considerado na seleção do circuito acionador. *Turbinas e motores são adequados para operação na base. Operação na ponta, por outro lado, requer sucessivas partidas e paradas, o que torna o motor mais vantajoso por possuir características como partida rápida e maior resistência ao desgaste advindo da operação intermitente.* Uma vez definido o regime de operação, a magnitude da carga elétrica deve ser considerada na seleção do circuito acionador, conforme mostrado na Tabela 3.1. Os valores ali apresentados têm relação com as informações disponíveis em uma base de dados de acionadores construída especificamente para os propósitos do presente trabalho. Essa base contém dados reais,

fornecidos pelos fabricantes, de 19 motores (de 160 a 2100 kW) e 14 turbinas (de 3929 a 52800 kW). Por conveniência, é imposto um número máximo de acionadores em uma planta: 20 motores ou 6 turbinas, que, juntamente com os valores de potência nominal dos acionadores, definem os limites de demanda observados na Tabela 3.1. O menor dos acionadores da base de dados tem potência de 160 kW. Como os acionadores não devem operar com carga inferior a 50%¹³, tem-se 80 kW como limite inferior de demanda de energia elétrica, como mostrado na primeira linha da Tabela 3.1. Pela mesma razão, o valor de 1964,5 kW é o limite inferior para seleção de turbinas. Já o limite superior para escolha do motor é definido pelo número máximo de motores admitido em uma planta e pela potência do maior motor disponível (20 x 2100 kW = 42000 kW). Do mesmo modo, determina-se o limite superior para seleção de turbinas (6 x 52800 kW = 316800 kW).

Tabela 3.1. Seleção do circuito acionador em função da carga de energia elétrica.

$D_{e,max}$ (kW)	CA1	CA2	Justificativa
$D_{e,max} < 80$	N	N	O menor acionador ficaria superdimensionado
$80 \leq D_{e,max} \leq 1964,5$	S	N	Motores ok. A menor turbina ficaria superdimensionada
$1964,5 < D_{e,max} \leq 42000$	S	S	Motores ok. Turbinas ok.
$42000 < D_{e,max} \leq 316800$	N	S	Turbinas ok. O maior motor ficaria subdimensionado
$D_{e,max} > 316800$	N	N	O maior acionador ficaria subdimensionado

A definição do circuito acionador envolve também os seguintes aspectos:

- a. Resposta de carga: turbinas respondem mais rapidamente a uma variação na carga do que motores, embora os últimos apresentem maior eficiência em condição de carga parcial;
- b. Disponibilidade e confiabilidade: turbinas apresentam maior disponibilidade e confiabilidade que motores;

¹³ Ver seção 3.6.1.

- c. Custo de instalação: considerando-se o desenvolvimento tecnológico atual, *motores apresentam custos de instalação (R\$/MW) menores que turbinas para capacidade instalada inferior a 15 MW. Para instalações superiores a 25 MW, os custos de instalação de turbinas são menores que os de motores. Entre 15 e 25 MW, os custos de instalação são similares;*
- d. Rejeição de calor do acionador: fundamental para se determinar os circuitos de recuperação de calor. Novamente considerando-se o desenvolvimento tecnológico atual, *o balanço de energia de turbinas resulta em aproximadamente 1/3 da energia do combustível convertida em energia elétrica, enquanto que os 2/3 restantes são rejeitados através de calor associado aos gases de exaustão em alta temperatura. Diferente das turbinas, que rejeitam calor predominantemente pelos gases de exaustão, motores rejeitam calor também através da água de arrefecimento das camisas. O balanço de energia do motor resulta em aproximadamente 1/3 da energia do combustível convertida em energia elétrica, 1/3 rejeitado através de calor associado aos gases de exaustão em alta temperatura e 1/3 rejeitado através de calor associado à água de arrefecimento em baixa temperatura.*

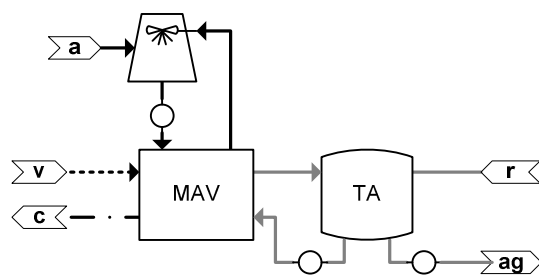
3.4. DEFINIÇÃO DOS CIRCUITOS DE RECUPERAÇÃO DE CALOR

No presente trabalho, considera-se que a cogeração é caracterizada se a recuperação de calor for suficiente para produzir no mínimo metade da carga térmica útil requerida. Nesse caso, os equipamentos de reserva complementam o restante da carga. Esse limite se justifica porque quanto maior a parcela da demanda térmica atendida pela recuperação de calor, maior a possibilidade de se viabilizar economicamente o investimento na planta de cogeração. De modo geral, a disponibilidade de calor rejeitado pelos acionadores e a magnitude das cargas requeridas definem a escolha dos circuitos de recuperação de calor. Um circuito de recuperação de calor é concebido como uma combinação de componentes que deve satisfazer a 1ª e 2ª Leis da Termodinâmica, bem como a conservação da massa.

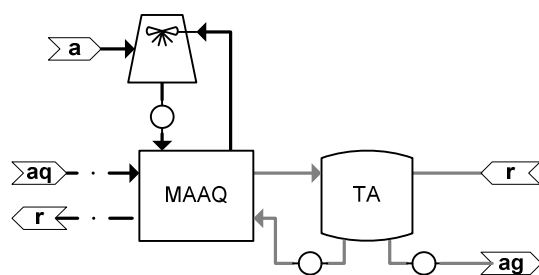
Os circuitos de água gelada são escolhidos se houver carga de água gelada. São mostrados na Figura 3.5 e descritos a seguir:

CAG1: CircuitoAguaGelada1, composto de máquina de refrigeração por absorção a vapor (duplo efeito), torre de resfriamento, tanque de termoacumulação e bombas;

CAG2: CircuitoAguaGelada2, composto de máquina de refrigeração por absorção a água quente (simples efeito), torre de resfriamento, tanque de termoacumulação e bombas.



CAG1



CAG2

Figura 3.5. Circuitos de água gelada CAG1 e CAG2

As heurísticas para seleção dos circuitos de água gelada relacionam as magnitudes da carga de água gelada e da carga de energia elétrica, bem como com a capacidade que os circuitos acionadores selecionados têm de gerar água gelada a partir de suas vias de rejeição de calor. Com relação às demandas de energia, a condição de seleção de um determinado

circuito de água gelada é que a demanda de água gelada seja menor ou igual à capacidade de geração de água gelada a partir do calor rejeitado pelos acionadores. Considerando ainda que a recuperação de calor deve ser suficiente para atender no mínimo metade da demanda térmica, tem-se portanto:

$$D_{ag} \leq 2\dot{Q}_{ag} \quad (3.4)$$

Motores podem gerar água gelada a partir de máquinas de refrigeração por absorção a vapor (MAV), utilizando-se de vapor gerado através da recuperação de calor dos gases de exaustão. O COP típico dessas máquinas é 1,1. Motores podem também gerar água gelada através de máquinas a água quente (MAAQ), cujo COP típico é 0,6. Logo, a capacidade do motor gerar água gelada a partir dos gases de exaustão e da água de arrefecimento das camisas é dada por:

$$\dot{Q}_{ag} \cong 1,1\dot{Q}_g + 0,6\dot{Q}_{aq} \quad (3.5)$$

Lembrando do balanço de energia típico de um motor (seção 3.3), o calor rejeitado pelos gases de exaustão é aproximadamente igual ao rejeitado pela água de arrefecimento, que é também aproximadamente igual à potência elétrica do motor. Baseado na hipótese de que os acionadores operem em paridade elétrica, pode-se afirmar que a potência do motor é aproximadamente igual à demanda de energia elétrica, resultando em:

$$\dot{Q}_{ag} \cong 1,1D_{e,max} + 0,6D_{e,max} = 1,7D_{e,max} \quad (3.6)$$

Substituindo-se a Eq. 3.6 na Eq. 3.4, tem-se finalmente:

$$D_{ag} \leq 3,4D_{e,max} \quad (3.7)$$

De modo similar, são determinadas as heurísticas para seleção de circuitos de água gelada considerando o circuito acionador baseado em turbinas. O quadro completo das heurísticas para seleção dos circuitos de água gelada é apresentado na Tabela 3.2. A Eq. 3.7, em particular, é a heurística apresentada na primeira linha dessa tabela.

Tabela 3.2. Heurísticas para seleção dos circuitos de água gelada.

Circuito acionador	D_{ag} (kW)	CAG1	CAG2	Justificativa
CA1	$D_{ag} \leq 3,4D_{e,max}$	S	S	O motor rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de água gelada requerida através de MAV e/ou MAAQ.
	$D_{ag} > 3,4D_{e,max}$	N	N	O motor não rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de água gelada requerida através de MAV e/ou MAAQ.
CA2	$D_{ag} \leq 2,2D_{e,max}$	S	N	A turbina rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de água gelada requerida através de MAV.
	$2,2D_{e,max} < D_{ag} \leq 4,4D_{e,max}$	S	N	É necessário pós-queimador para gerar no mínimo metade da carga de água gelada requerida através de MAV.
	$D_{ag} > 4,4D_{e,max}$	N	N	A turbina não rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de água gelada requerida através de MAV.

Os circuitos para geração de vapor são escolhidos se houver carga de vapor. Mesmo que o cliente não necessite de vapor, a seleção do CircuitoAguaGelada1 exige que um circuito para geração de vapor seja selecionado. Os circuitos para geração de vapor são:

CV1: CircuitoVapor1, composto de caldeira de recuperação, bombas e tanque de condensado;

CV2:CircuitoVapor2, composto de caldeira de recuperação com pós-queima, bombas e tanque de condensado;

CV3:CircuitoVapor3, composto de caldeira de recuperação, trocador de calor água-água, radiador, bombas e tanque de condensado.

O CircuitoVapor1 recupera o calor dos gases de exaustão dos acionadores através de caldeira de recuperação. O CircuitoVapor2 permite um aumento da temperatura dos gases de exaustão através de um pós-queimador. Já o CircuitoVapor3 recupera uma pequena parcela do calor da água das camisas para pré-aquecer o condensado. No entanto, esse circuito só pode ser selecionado se a temperatura do condensado for menor que a da água das camisas. Os circuitos de vapor são mostrados na Figura 3.6 e as heurísticas para sua seleção são mostradas na Tabela 3.3. Essas heurísticas são determinadas do mesmo modo que as heurísticas de seleção dos circuitos de água gelada, ou seja, relacionando-se as magnitudes das cargas de vapor e de energia elétrica, e a capacidade que os circuitos acionadores selecionados têm de gerar vapor a partir de suas vias de rejeição de calor.

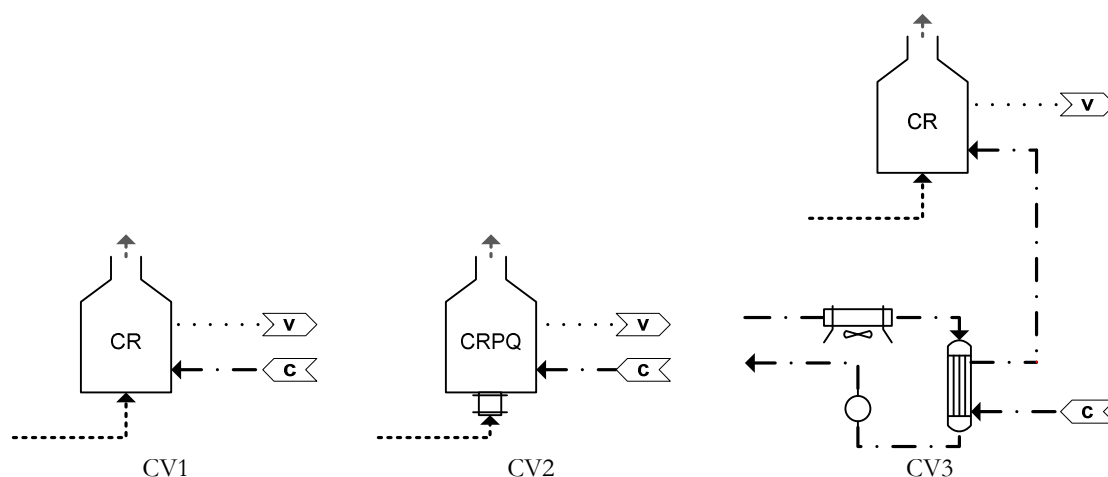


Figura 3.6. Circuitos de vapor CV1, CV2 e CV3.

Tabela 3.3. Heurísticas para seleção dos circuitos de vapor.

Circuito acionador	D_v (kW)	CV1	CV2	CV3	Justificativa
CA1	$D_v \leq 2D_{e,Max}$	S	N	S	O motor rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de vapor requerida.
	$D_v > 2D_{e,Max}$	N	N	N	O motor não rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de vapor requerida.
CA2	$D_v \leq 2D_{e,Max}$	S	N	N	A turbina rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de vapor requerida.
	$2D_{e,max} < D_v \leq 4D_{e,max}$	S	S	N	É necessário pós-queimador para gerar no mínimo metade da carga de vapor requerida.
	$D_v > 4D_{e,max}$	N	N	N	A turbina não rejeita calor suficiente para gerar no mínimo metade da carga de vapor requerida.

Os circuitos para produção de água quente são utilizados exclusivamente para fornecer energia para o CircuitoAguaGelada2. Assim, sua seleção está condicionada às heurísticas de seleção do CircuitoAguaGelada2 (Tabela 3.2). Os circuitos para produção de água quente são:

CAQ1: CircuitoAguaQuente1, composto de trocador de calor água-água, radiador e bomba;

CAQ2: CircuitoAguaQuente2, composto de trocador de calor água-água, trocador de calor gás-água, radiador e bomba;

Ambos os circuitos de água quente recuperam o calor da água das camisas com trocador de calor água-água. O CircuitoAguaQuente2 recupera também o calor dos gases de exaustão com trocador gás-água, possibilitando uma maior vazão de água quente utilizada pelo CircuitoAguaGelada2. Como consequência, a capacidade de geração de água gelada aumenta. Os circuitos de água quente são mostrados na Figura 3.7.

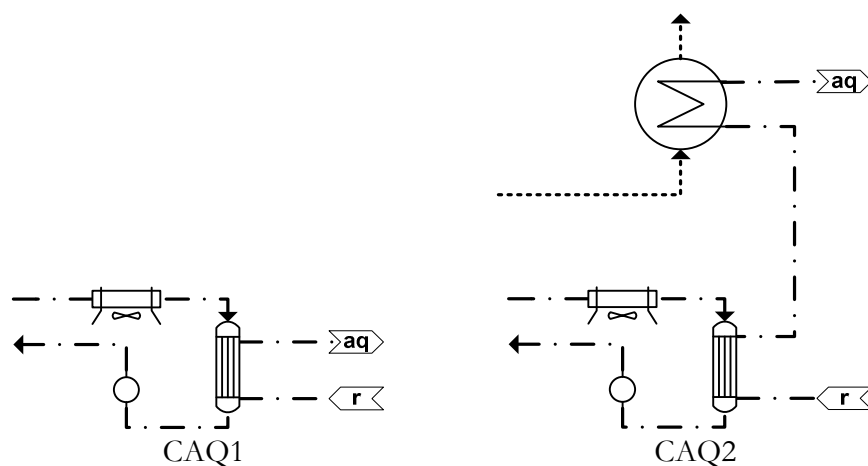


Figura 3.7. Circuitos de água quente CAQ1 e CAQ2

Todas as concepções de circuitos mostradas anteriormente são consideradas em um contexto de estado-da-arte, o que quer dizer que a validade de uma concepção depende de suas características e limitações no presente momento.

3.5. COMBINAÇÃO DOS CIRCUITOS

A compatibilidade entre dois circuitos depende fundamentalmente dos fluidos que transportam o calor de um para outro. Assim, um circuito que requer gases de exaustão não é compatível com outro que rejeita calor na forma de água quente.

Os circuitos de água gelada não são compatíveis com os circuitos acionadores, já que eles não recuperam diretamente o calor rejeitado por motores¹⁴ ou turbinas. Assim, a seleção do CircuitoAguaGelada2 exige um circuito de produção de água quente, enquanto que a seleção do CircuitoAguaGelada1 exige um circuito de geração de vapor. Por outro lado, se o CircuitoAcionador1 for escolhido e houver carga de vapor e de água gelada, o

¹⁴ Em verdade existem plantas nas quais máquinas de refrigeração acionadas por meio de água quente usam diretamente a própria água das camisas dos motores como fonte de calor. No entanto, *é recomendável que se utilize um trocador de calor intermediário para desacoplar as vazões da água das camisas do motor e da máquina de absorção.*

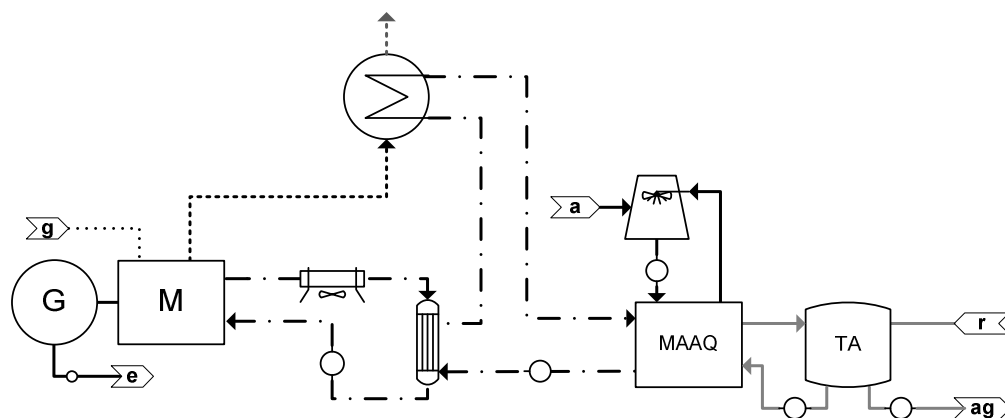
CircuitoAguaGelada1 não pode ser selecionado, porque os gases de exaustão do acionador são usados na geração do vapor que deve atender a carga.

Note que o CircuitoVapor2 só pode ser escolhido se o CircuitoAcionador2 for escolhido, já que a concentração de oxigênio nos gases de exaustão proveniente de motores não é, em geral, suficiente para suportar pós-queima, sendo necessário adicionar ar suplementar. Da mesma forma, o CircuitoVapor3 só pode ser escolhido se o CircuitoAcionador1 for escolhido, porque o pré-aquecimento do condensado é feito recuperando-se o calor da água das camisas com trocador de calor. O CircuitoVapor1 é compatível com ambos os circuitos acionadores.

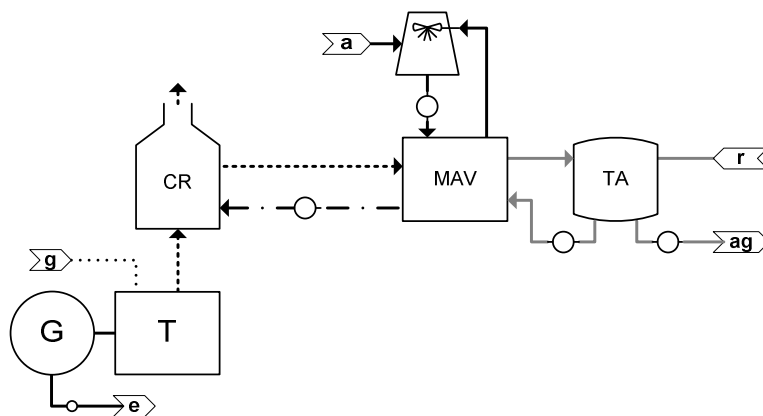
Os circuitos para produção de água quente são compatíveis somente com o CircuitoAcionador1 e utilizados exclusivamente para fornecer energia para o CircuitoAguaGelada2.

Como pode haver mais de um circuito capaz realizar uma dada função, diferentes combinações de circuitos podem ser geradas (respeitadas as restrições). Assim, mais de uma solução pode ser gerada para satisfazer um mesmo conjunto de requisitos. Um exemplo disso é ilustrado na Figura 3.8, onde são apresentadas duas soluções conceitualmente diferentes para cargas de energia elétrica e água gelada como requisitos de projeto¹⁵.

¹⁵ Nesse caso, dependendo da magnitude das cargas, até cinco soluções conceitualmente diferentes podem ser geradas pela combinação dos circuitos apresentados. Por simplicidade, apenas duas são apresentadas.



Solução 1: CA1+CAQ2+CAG2



Solução 2: CA2+CV1+CAG1

Figura 3.8. Exemplo de diferentes soluções conceituais para um mesmo conjunto de requisitos de projeto.

3.6. ESPECIFICAÇÃO DOS COMPONENTES

Aqui se abordam algumas atividades mais ligadas à fase de projeto preliminar, já que os principais componentes (acionadores, máquinas de refrigeração, caldeiras de recuperação e trocadores de calor) de cada uma das soluções geradas são especificados. Importa ressaltar que a natureza dessa etapa do projeto é fundamentalmente algorítmica (os diagramas de blocos apresentados ao longo dessa seção evidenciam isso muito claramente),

sendo que conhecimento especializado é requerido para definir alguns parâmetros que se façam necessários, tais como limites e faixas de aplicação.

3.6.1. ACIONADORES

Como a especificação dos componentes de recuperação de calor depende do calor rejeitado pelo acionador, este último é o primeiro componente a ser especificado. Para um dado acionador com potência nominal \dot{W}_{ac} , o número de acionadores é calculado pela Eq.

3.8. *Os acionadores devem atender 10% além da carga máxima, prevendo as cargas auxiliares (quadros, bombas, ventiladores etc) que a planta de cogeração requer.*

$$n_{ac} = \text{maior inteiro} \left(\frac{1,1D_{e,max}}{\dot{W}_{ac}} \right) \quad (3.8)$$

Os limites para o número de acionadores são mostrados na Eq. 3.9. *No mínimo dois motores são requeridos na operação de base para aumentar a disponibilidade e confiabilidade da planta.*

$$1 \leq n_{ac} \leq 6, \text{ para turbinas} \quad (3.9a)$$

$$1 \leq n_{ac} \leq 20, \text{ para motores na ponta} \quad (3.9b)$$

$$2 \leq n_{ac} \leq 20, \text{ para motores na base} \quad (3.9c)$$

A potência total da planta é dada pela Eq. 3.10.

$$\dot{W}_{pl} = n_{ac} \dot{W}_{ac} \quad (3.10)$$

A carga parcial dos acionadores é definida como a razão entre a demanda de energia elétrica e a potência da planta¹⁶ (Eq. 3.11). Como os acionadores comercialmente

¹⁶ Essa definição é válida se o acionador opera atendendo a demanda instantaneamente, que é a hipótese adotada no presente trabalho.

disponíveis suportam, em geral, uma sobrecarga de até 10% em breves intervalos de tempo (máximo 2 horas), a carga parcial máxima não deve exceder 1,1. *A carga parcial afeta fortemente a eficiência dos acionadores. Além disso, para valores de carga inferiores a 50%, os geradores não são capazes de manter a frequência em níveis estáveis.* Assim, a carga parcial mínima não deve ser menor que 0,5.

$$L = \frac{D_e(t)}{\dot{W}_{pl}} \quad (3.11a)$$

$$0,5 \leq L \leq 1,1 \quad (3.12b)$$

O fator de utilização dos acionadores (Eq. 3.12) é definido como a razão entre o consumo diário de energia elétrica no período de operação da planta (Eq. 3.1) e a energia que os acionadores disponibilizam no mesmo período.

$$\mu_{el} = \frac{\int_{t_0}^t D_e(t) dt}{\dot{W}_{pl}(t - t_0)} = \frac{\bar{D}_e}{\dot{W}_{pl}} \quad (3.12)$$

Dentre todos os acionadores contidos na base de dados, o escolhido é aquele que apresenta o maior fator de utilização. *Quanto maior o fator de utilização de um acionador, menores seus custos de instalação e operação.* É altamente desejável que o protótipo possua, portanto, uma função de otimização discreta que determine qual o acionador que possui o fator de utilização máximo. Como o espaço de soluções é baseado em uma base de dados de acionadores é relativamente pequena, o método de otimização por busca exaustiva é adotado.

Finalmente, o consumo de combustível do acionador é expresso pela Eq. 3.13.

$$\dot{m}_{\text{gn,ac}} = \frac{W_{\text{ac}}}{\eta_{\text{ac}} \text{PCI}} \quad (3.13)$$

3.6.2. CALDEIRAS DE RECUPERAÇÃO

O *pinch point*, o *approach point* e a temperatura dos gases que deixam a caldeira são parâmetros fundamentais na especificação da caldeira de recuperação aquatubulares. Neste trabalho a carga térmica é restrita a aplicações com vapor saturado e, portanto, as caldeiras selecionadas não dispõem de superaquecedor. Por outro lado, além do evaporador, elas podem dispor também de economizador. Caldeiras flamotubulares não são consideradas porque este é um conceito voltado para queima direta de combustível, de modo a maximizar a transferência de calor por radiação da chama.

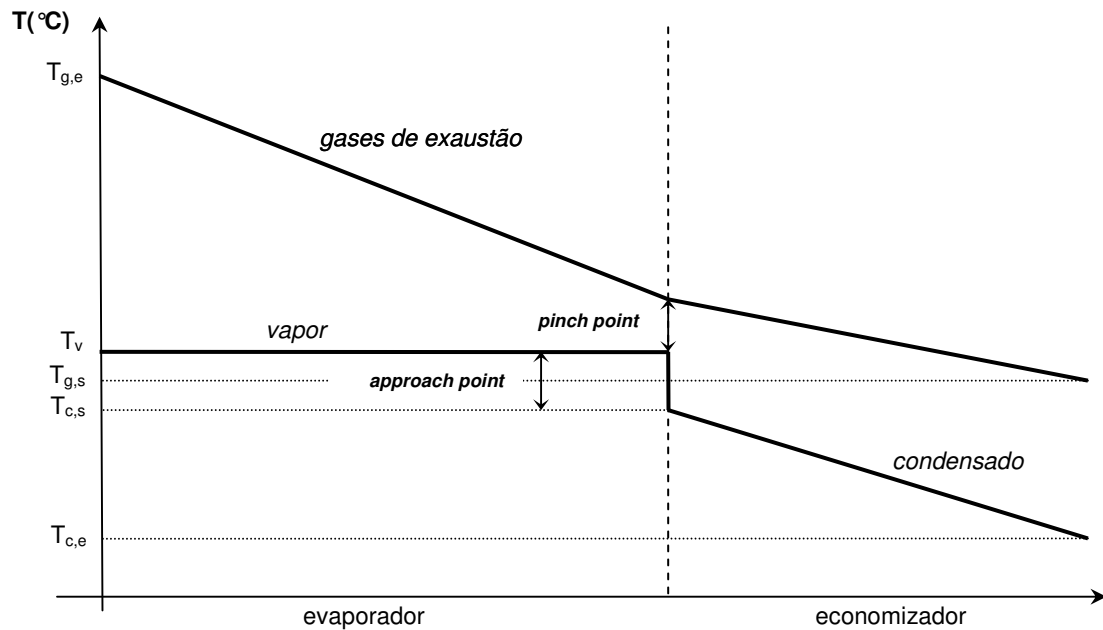


Figura 3.9. *Pinch point* e *approach point* de uma caldeira de recuperação.

Na Figura 3.9 são ilustrados o *pinch point* e o *approach point*. O *pinch point* é definido como a diferença entre a temperatura dos gases de exaustão que deixam o evaporador e a temperatura do vapor saturado. O *approach point* é definido como a diferença entre a temperatura do vapor saturado e a temperatura do condensado que deixa o economizador.

A 2ª Lei da Termodinâmica exige que o *pinch point* apresente sempre valores positivos. Já a limitação do *approach point* é de ordem econômica, pois não é desejável que ocorra mudança de fase no economizador, o que impõe um limite para sua área de troca. Quanto menor o *pinch point* ou o *approach point*, maior a área de troca (e o custo) da caldeira. Conseqüentemente, menor a temperatura dos gases de exaustão que deixam a caldeira, e maior a quantidade de calor recuperada. Nota-se, portanto, que o *pinch point* expressa a dependência entre esses parâmetros, sendo 20 °C um valor considerado adequado para a maioria das instalações (Orlando, 1996). *Uma faixa de valores aceitáveis para o pinch point está entre 5 e 30 °C. Para o approach point recomendam-se valores da ordem de 10 °C (Patel, 2007), sendo comum estabelecer valores entre 5 e 20 °C.* A Eq. 3.14 expressa a temperatura dos gases de exaustão em função do *pinch point* e do *approach point*, que é calculada iterativamente (Figura 3.10).

$$T_{g,s} = T_{g,e} - (T_{g,e} - T_v(P) - pp) \frac{h_v(P) - h(P, T_c)}{h_v(P) - h(P, \{T_v(P) - ap\}} \quad (3.14)$$

Se a diferença entre a temperatura do vapor e a do condensado for menor que 5 °C, dispensa-se o economizador e o *approach point* deixa de ter significado. Nesse caso, o *pinch point* é definido como 20 °C. Recomenda-se que a temperatura dos gases de exaustão na saída da caldeira de recuperação seja superior a 130 °C para evitar a condensação de ácidos. A capacidade da caldeira de recuperação é então calculada através da Eq. 3.15.

$$\dot{Q}_{cr} = \dot{m}_g \bar{c}_{p,g} (T_{g,e} - T_{g,s}) \quad (3.15)$$

No presente trabalho, o valor do calor específico médio dos gases de exaustão visto na Eq. 3.15 é considerado constante e igual a 1,2 kJ/KgK. Embora não seja uma aproximação

rigorosa do ponto de vista termodinâmico¹⁷, é uma abordagem heurística adequada em uma etapa de projeto preliminar.

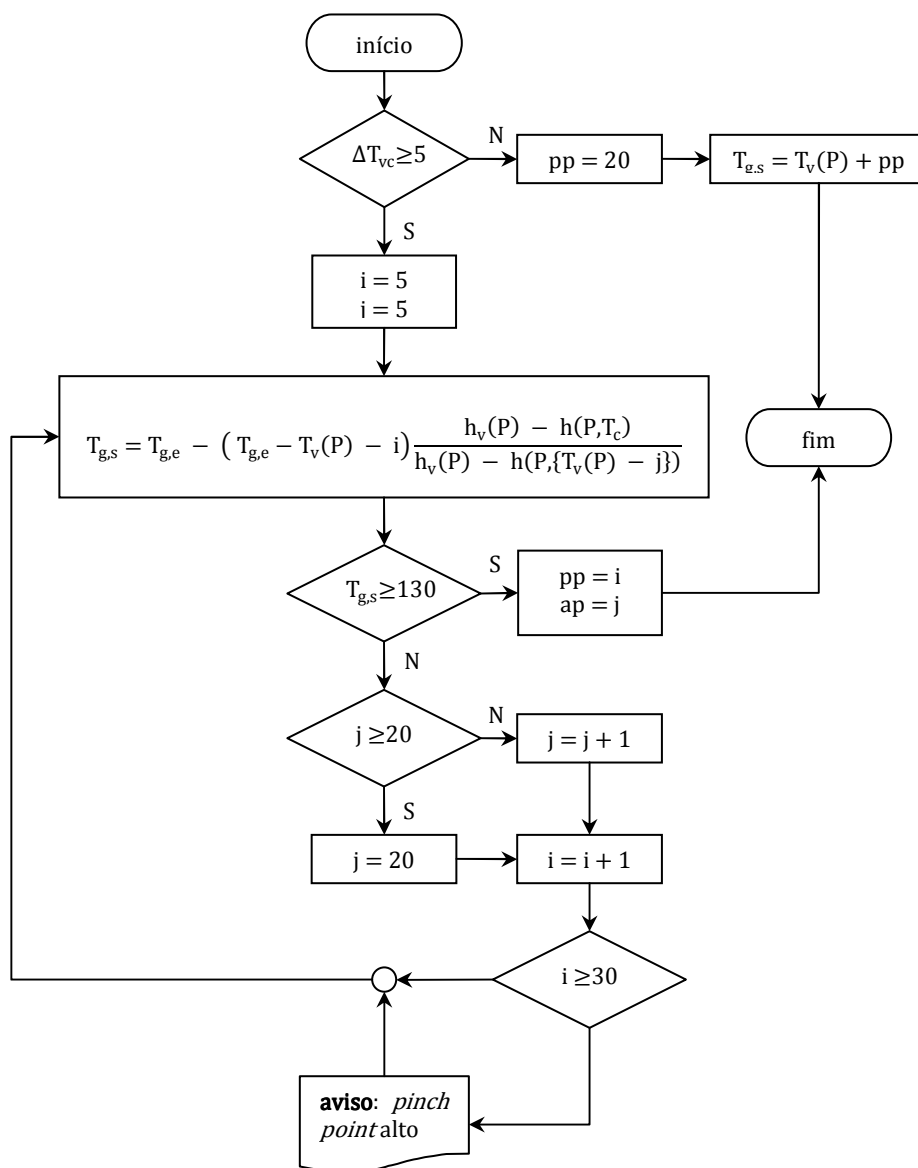


Figura 3.10. Cálculo iterativo do *pinch point*, *approach point* e temperatura de saída da caldeira de recuperação.

Para os circuitos de vapor CV1 e CV3, o número de caldeiras de recuperação é calculado iterativamente, como mostrado na Figura 3.11. Note que se a demanda não for

¹⁷A rigor, $\bar{c}_{p,g} = \frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} c_{p,g}(T) dT$

totalmente atendida, torna-se necessário que as caldeiras de reserva sejam usadas para complementar o restante.

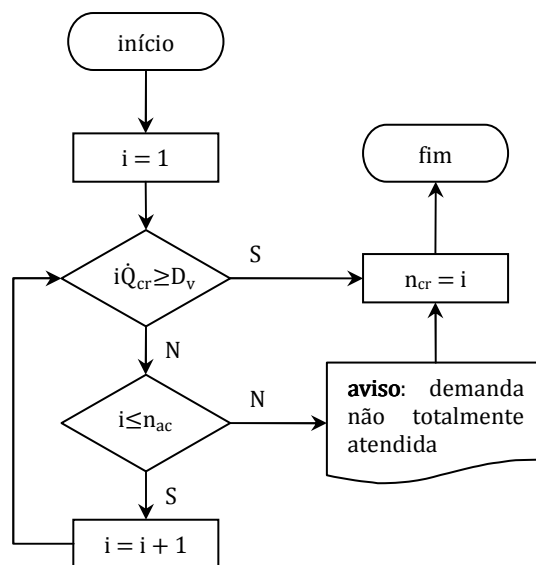


Figura 3.11. Cálculo iterativo do número de caldeiras de recuperação para os circuitos de vapor CV1 e CV3.

No caso do circuito de vapor CV2, a demanda de vapor é, muito provavelmente, maior que a quantidade de calor recuperável nos gases de exaustão de turbinas. Logo, pós-queimadores devem ser dimensionados. O pós-queimador tem a função de aumentar a temperatura dos gases de exaustão da turbina, através da queima de gás natural, antes destes serem admitidos na caldeira de recuperação. Por questões metalúrgicas, essa temperatura é limitada a 900 °C (Orlando, 1996) e é calculada de acordo com a Eq. 3.16. Ainda segundo Orlando (1996), pós-queimadores podem apresentar eficiências da ordem de 0,98. A potência requerida por um pós-queimador é dada pela Eq. 3.17. O fator de utilização da instalação de vapor é calculado através da Eq. 3.18. Note que os termos associados aos componentes de reserva (caldeiras a gás e pós-queimadores) só são computados se esses componentes forem utilizados também como complemento. O número de caldeiras de recuperação e de pós-queimadores é calculado iterativamente,

como mostrado na Fig. 3.12. Também aqui é necessário que as caldeiras de reserva sejam usadas para complemento se a demanda não for totalmente atendida.

$$T_{pq} \cong T_g + \frac{D_v - \dot{Q}_{cr}}{\eta_{pq} \dot{m}_g \bar{c}_{p,g}} \quad (3.16)$$

$$\dot{Q}_{pq} = \dot{m}_g \bar{c}_{p,g} (T_{pq} - T_g) \quad (3.17)$$

$$\mu_v = \frac{D_v}{n_{cr} \dot{Q}_{cr} + n_{pq} \dot{Q}_{pq} + n_{cg} \dot{Q}_{cg}} \quad (3.18)$$

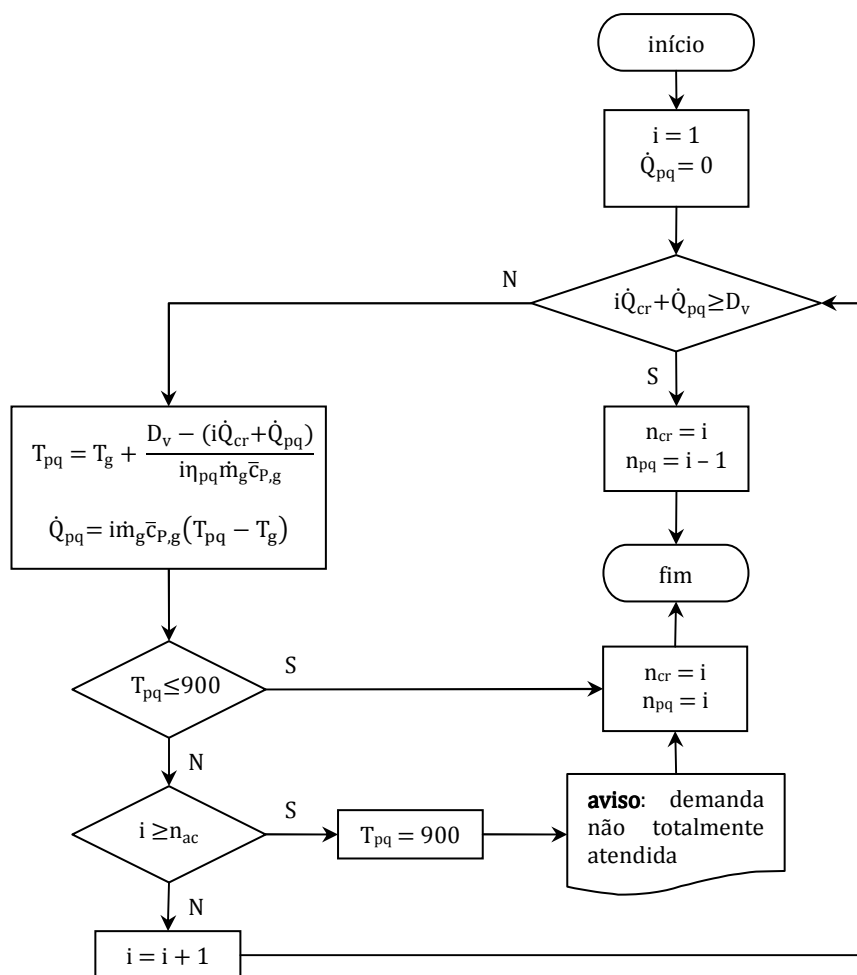


Figura 3.12. Cálculo iterativo do número de caldeiras de recuperação e de pós-queimadores para o circuito de vapor CV2.

3.6.3. MÁQUINAS DE REFRIGERAÇÃO POR ABSORÇÃO

A especificação das máquinas de refrigeração por absorção é um procedimento que depende do regime de operação da planta. Para operação na base, as máquinas de refrigeração por absorção operam 24 horas por dia. A potência de refrigeração que pode ser gerada ao se recuperar o calor rejeitado pelos acionadores é mostrada na Eq. 3.19.

$$\dot{Q}_{mra}^* = COP_a \dot{Q}_{ac} \quad (3.19)$$

Do mesmo modo que os acionadores, também há uma base de dados contendo dados reais de máquinas de refrigeração¹⁸. O número de uma dada máquina de refrigeração, cuja capacidade de refrigeração seja \dot{Q}_{mra} , é calculado pela Eq. 3.20.

$$n_{mra}^* = \frac{\dot{Q}_{mra}^*}{\dot{Q}_{mra}} \quad (3.20)$$

O número de máquinas de refrigeração por absorção necessárias para atender o consumo de água gelada não é, necessariamente, igual àquele calculado na Eq. 3.20. O cálculo desse número é iterativo e dependente do regime de operação da planta. Se o regime for base, o procedimento de cálculo do número de máquinas n_{mrc} é dado pela Fig. 3.13. Se o regime for ponta, o número de máquinas n_{mrc} e seu tempo de operação Δt são calculados iterativamente, como ilustrado na Fig. 3.14. Durante o tempo de operação a planta deve ser capaz de gerar e armazenar em tanques de termoacumulação toda a água gelada que a instalação necessita durante um dia inteiro.

¹⁸ São 25 máquinas acionadas por água quente (30 a 950 TR), 23 máquinas acionadas por vapor (100 a 1500 TR) e 22 máquinas acionadas por compressão mecânica (120 a 1500 TR).

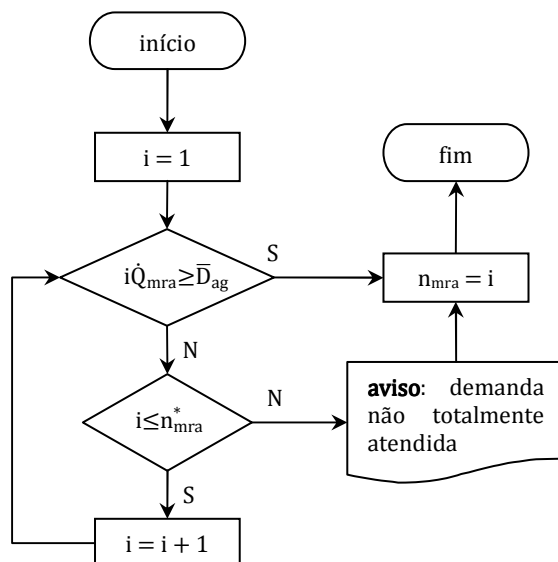


Figura 3.13. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por absorção para planta operando na base.

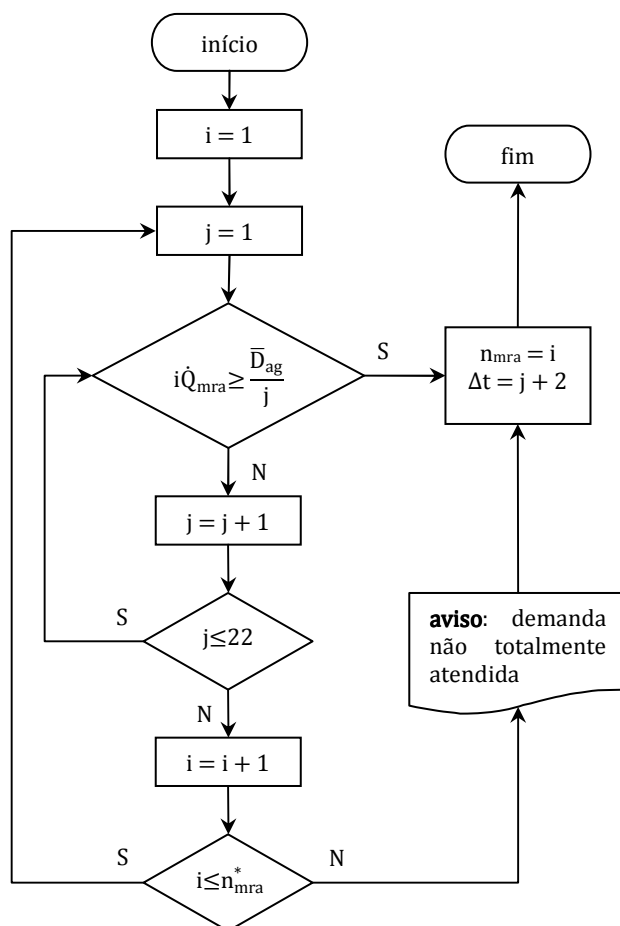


Figura 3.14. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por absorção para planta operando na ponta.

Define-se o fator de utilização da instalação de água gelada de acordo com a Eqs. 3.21. Note que os termos associados aos componentes de reserva (máquinas de refrigeração por compressão) só são computados se esses componentes forem utilizados também como complemento.

$$\mu_{ag} = \frac{\bar{D}_{ag}}{n_{mra}\dot{Q}_{mra} + n_{mrc}\dot{Q}_{mrc}} \quad (3.21)$$

Dentre as máquinas de refrigeração disponíveis, deve ser escolhida a que apresentar maior fator de utilização e maior tempo de operação. A maximização desses parâmetros garante máquinas menores, de menor custo de aquisição, cuja potência é mais bem utilizada. Assim como os acionadores, uma função de otimização discreta que maximize o fator de utilização e o tempo de operação também é requerida para as máquinas de refrigeração. Como o espaço de soluções é baseado em uma base de dados de máquinas de refrigeração relativamente pequena, o método de otimização por busca exaustiva é adotado.

3.6.4. TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são especificados através de balanço de energia (Eq. 3.22) em um volume de controle ao redor deles (Figura 3.15).

$$\dot{Q}_{tc} = \dot{m}_q \bar{c}_{p,q} (T_{q,e} - T_{q,s}) = \dot{m}_f \bar{c}_{p,f} (T_{f,s} - T_{f,e}) \quad (3.18)$$

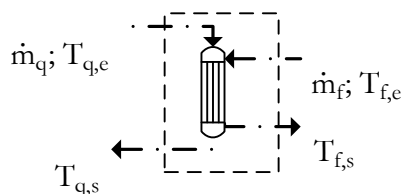


Figura 3.15. Balanço de energia em um trocador de calor.

Dependendo da circunstância, a Eq. 3.18 é utilizada para determinar a temperatura de saída do fluido frio ou sua vazão, já que todos os demais parâmetros presentes na equação são conhecidos.

3.6.5. COMPONENTES DE RESERVA E COMPLEMENTO: CALDEIRAS A GÁS E MÁQUINAS DE REFRIGERAÇÃO ACIONADAS POR COMPRESSÃO

Havendo cargas térmicas, componentes de reserva devem ser previstos para atender a essas demandas em caso de parada da planta de cogeração. Assim, caldeiras a gás natural e máquinas de refrigeração por compressão são especificadas conforme a necessidade. No presente trabalho, considera-se que os componentes de reserva devem ser capazes de suprir toda a demanda quando necessário. Os componentes de reserva podem ser utilizados também para complementar a demanda se os componentes de recuperação de calor não a atenderem completamente. Esse é o caso quando surge o aviso de demanda não totalmente atendida nos fluxogramas das Figuras 3.11, 3.12, 3.13 e 3.14.

Dependendo da vazão e pressão requerida, as caldeiras a gás podem ser flamatubulares ou aquatubulares. Em geral, se recomenda caldeiras aquatubulares para pressões superiores a 15 bar e vazões maiores que 15 t/h (Bazzo, 1995), *embora, sob encomenda, alguns fabricantes disponibilizem caldeiras flamatubulares para pressões de até 25 bar*. Logo, dependendo da pressão, o número de caldeiras e sua vazão de vapor devem ser calculados iterativamente, como mostra a Figura 3.16.

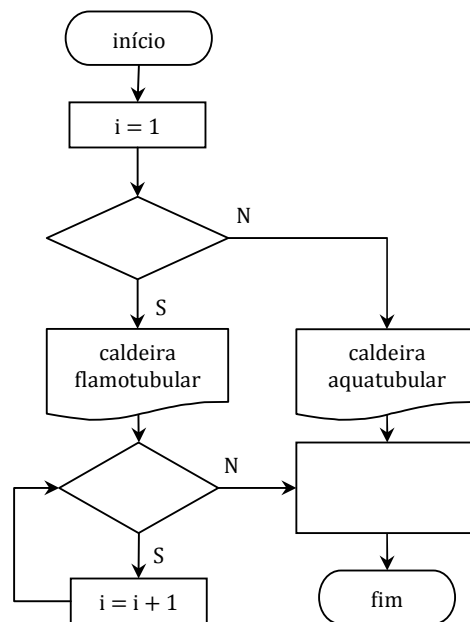


Figura 3.16. Cálculo do número de caldeiras de reserva e vazão de vapor.

A eficiência de caldeiras de queima direta para geração de vapor saturado é da ordem de 0,85. Sua potência é calculada através da Eqs. 3.23, já levando em conta a taxa de retorno de condensado r . Caso as caldeiras reservas sejam utilizadas como complemento, seu consumo de combustível é calculado pela Eq. 3.24.

$$\dot{Q}_{cg} = \frac{\dot{m}_{v,cg}[h_v(P) - r h(P,T_c) - (1-r) h(P,T_0)]}{\eta_{cg}} \quad (3.23)$$

$$\dot{m}_{gn,cg} = \frac{D_v - n_{cr}\dot{Q}_{cr}}{n_{cg}\eta_{cg}PCI} \quad (3.24)$$

No caso de haver carga de água gelada, máquinas de refrigeração por compressão mecânica de reserva são requeridas. De modo análogo às caldeiras a gás, estas máquinas de refrigeração são especificadas para atender a toda a carga de água gelada em caso de parada da planta de cogeração. Devem operar com energia elétrica importada da rede – do contrário, os acionadores deveriam ser dimensionados para atendê-las também. A operação com energia elétrica importada da rede impõe um limite superior ao seu período diário de funcionamento de 21 horas, evitando as 3 horas do horário de ponta. Por operarem independentemente da planta de cogeração, a especificação das máquinas independe do regime de operação da planta. Para uma dada máquina de refrigeração por compressão mecânica que tenha capacidade de refrigeração \dot{Q}_{mrc} , o número de máquinas n_{mrc} e seu período de operação Δt são calculados iterativamente, como mostrado na Figura 3.17.

O fator de utilização das máquinas de refrigeração por compressão é calculado de modo idêntico ao das máquinas por absorção. Analogamente a essas últimas e pelas mesmas razões, deve ser escolhida a máquina por compressão que apresentar maior fator de utilização e maior tempo de operação. Caso as máquinas por compressão sejam utilizadas para complemento, seu consumo de energia elétrica é dado pela Eq. 3.25.

$$W_{mrc} = \frac{1}{n_{mrc}COP_c} \left[\bar{D}_{ag} - \frac{n_{mra}\dot{Q}_{mra}}{\Delta t_a} \right] \quad (3.25)$$

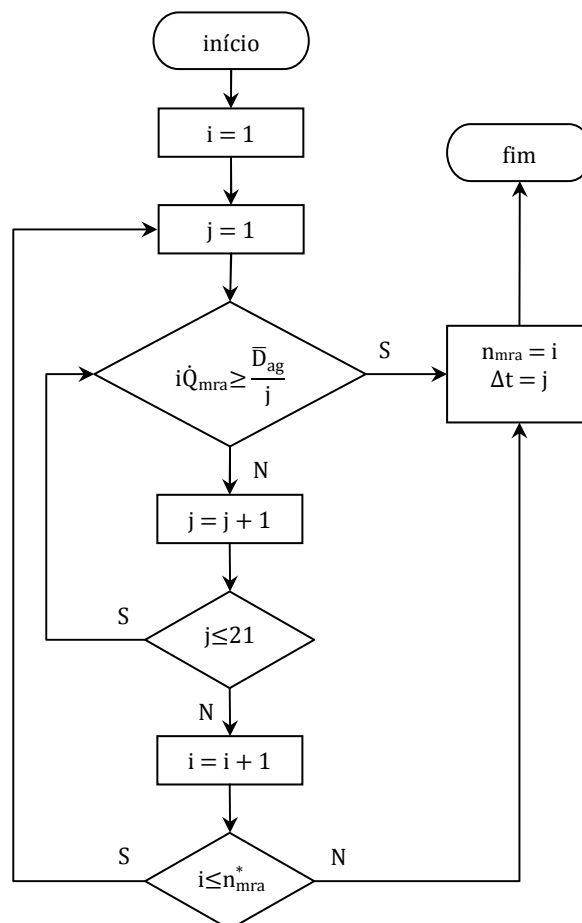


Figura 3.17. Cálculo iterativo do número de máquinas de refrigeração por compressão de reserva.

3.7. APRESENTAÇÃO DAS SOLUÇÕES

A metodologia apresentada na Figura 3.1 se encerra com a apresentação das soluções, ou seja, a elaboração de documentos – um para cada solução conceitual diferente – que contenham os requisitos de projeto, os diagramas apresentando os componentes e suas interconexões, especificações e os parâmetros de desempenho da planta. Dentre esses parâmetros, o mais importante, sob o ponto de vista de conservação de energia, é a taxa de energia primária¹⁹ α , definida pela Eq. 3.26.

¹⁹ Do inglês *Primary Energy Rate*, termo encontrado na literatura.

$$\alpha = \frac{\bar{D}_e + D_v + \bar{D}_{ag}}{(n_{ac}\dot{m}_{gn,ac} + n_{pq}\dot{m}_{gn,pq} + n_{cg}\dot{m}_{gn,cg})PCI + n_{mrc}\dot{W}_{mrc}} \quad (3.26)$$

Apesar da similaridade da formulação, a taxa de energia primária não deve ser confundida com a eficiência, pois esta não pode exceder 1. Essa discussão é aprofundada no Apêndice A e conduzida em mais detalhes por Matelli et al. (2007). Note que, se não houver demanda por água gelada, a taxa de energia primária se reduz à eficiência. Cada solução apresenta uma taxa de energia primária. Do ponto de vista estritamente técnico, aquela que apresentar a maior taxa de energia primária deve ser escolhida.

O fator de utilização pode ser estendido para a planta de cogeração ao se relacionar a potência efetivamente disponibilizada pela planta e sua capacidade, como mostrado pela Eq. 3.27. No denominador desta equação são computadas as potências associadas ao acionador primário, à caldeira de recuperação, ao pós-queimador, à caldeira a gás e às máquinas de refrigeração por absorção e compressão. É um parâmetro associado à ociosidade da instalação e tem, portanto, relação com aspectos econômicos.

$$\mu_{pl} = \frac{\bar{D}_e + D_v + \bar{D}_{ag}}{n_{ac}\dot{W}_{ac} + n_{cr}\dot{Q}_{cr} + n_{pq}\dot{Q}_{pq} + n_{cg}\dot{Q}_{cg} + n_{mra}\dot{Q}_{mra} + n_{mrc}\dot{Q}_{mrc}} \quad (3.27)$$

Os termos associados aos componentes de reserva nas Eqs 3.27 (caldeiras a gás, pós-queimadores e máquinas de refrigeração por compressão) somente são computados se esses componentes forem utilizados também como complemento.

3.8. OBSERVAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada a aplicação de conceitos de metodologia de projeto para se avaliar as concepções tecnicamente viáveis de uma planta de cogeração. O

conhecimento associado ao projeto de plantas de cogeração a gás natural foi também apresentado e registrado. Esse conhecimento foi obtido principalmente através de interação com especialistas, sendo complementado por literatura especializada da área. Com base nesse conhecimento, o desenvolvimento do protótipo SE para projeto de plantas de cogeração é apresentado no próximo capítulo.

4. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO SE

Nesse capítulo é apresentado o desenvolvimento do protótipo SE para projeto de plantas de cogeração, com base no conhecimento descrito no capítulo anterior. Vê-se aqui uma revisão da literatura sobre sistemas computacionais aplicados a projeto de sistemas térmicos, a descrição das etapas de projeto e a descrição do protótipo (em termos de escopo, funções e base de conhecimento).

4.1. SISTEMAS COMPUTACIONAIS APLICADOS A PROJETOS DE SISTEMAS TÉRMICOS

Segundo Stoecker (1989), um sistema térmico é uma coleção de componentes cujos desempenhos são inter-relacionados, nos quais fluidos e energia – calor e trabalho – são transportados e transformados de modo a atender os requisitos de projeto. Uma planta de cogeração é, portanto, um sistema térmico que atende as necessidades de energia elétrica e calor útil do cliente.

O número de possíveis soluções, i.e, de combinações de componentes que satisfazem um conjunto de requisitos pode crescer fatorialmente conforme o problema se torne mais complexo. Na prática, restrições termodinâmicas limitam a complexidade do problema por impedir certas combinações (um escoamento frio não pode ser resfriado por um mais quente, por exemplo), tornando-o possível de ser resolvido computacionalmente. De fato, encontram-se na literatura diversos métodos computacionais que abordam projeto e otimização de sistemas térmicos/químicos, tais como o método nível a nível (Manninen e Zhu, 2001), a decomposição hierárquica (Douglas, 1988), a programação linear (Hostrup et al., 2001) e o método combinado (Mizsey e Fonyo, 1990). No caso de plantas de cogeração em particular, Balestieri e Correia (1997) aplicaram um modelo de otimização

multi-objetivo GDF²⁰, no qual parâmetros como custo, eficiência, emissões de poluentes e confiabilidade, são considerados simultaneamente para se obter uma solução que define um ciclo e sintetiza um esquema de planta.

Pode-se dizer que essas referências apresentam métodos matemáticos convencionais de busca, ou seja, métodos que não apresentam um claro processo de inferência. Ressalte-se que não apresentar um processo claro de inferência não é, de modo algum, uma limitação desses métodos. O que se deseja é explicitar as diferenças entre essas abordagens e aquelas baseadas em técnicas de IA. O uso dessas últimas é sugerido devido à capacidade que engenheiros especialistas têm de resolver esses problemas de forma robusta, como reportado nos seguintes trabalhos:

Fujita et al. (1996) propuseram um método baseado em algoritmo genético para encontrar configurações ótimas de plantas de cogeração. Apesar de ser classificado como IA (mais especificamente, computação evolutiva²¹), não se pode falar em processo de inferência em algoritmo genético, já que a computação evolutiva não exige conhecimento prévio sobre o problema para solucioná-lo. Além disso, pode ser muito complicado fazer com que algoritmos genéticos sejam capazes de explicar suas soluções.

Kott et al. (1989a; 1989b) incorporaram técnicas de IA em seu projetista autônomo de sistemas térmicos. No entanto, as técnicas tinham o propósito de meramente reduzir o espaço de busca por soluções. Os autores optaram por esta estratégia porque não lhes era claro – e expressaram isso textualmente – se é realmente desejável que o computador emule processos cognitivos humanos. Argumentaram que isso pode conduzir a um algoritmo que seria impraticável ou indesejável para engenheiros projetistas e concluíram

²⁰ Acrônimo dos criadores do método: Geoffrion, Dyer e Feinberg.

²¹ O ramo da computação natural contém os tópicos de vida artificial, geometria fractal, sistemas complexos e inteligência computacional, sendo que este último inclui redes neurais artificiais, sistemas nebulosos (*μυζηση*) e a computação evolutiva. (Heitkötter e Beasley, 2000).

que estudos cognitivos sobre projetistas humanos não precisam ser conduzidos. Além de não haver evidências de que tal algoritmo seja impraticável, a emulação de processos cognitivos *não implica* a necessidade de se realizar estudos cognitivos. A existência de *shells* e sua aplicação bem sucedida em diferentes domínios de projetos de engenharia demonstram isso. Algumas dessas aplicações são projetos de sistemas hidráulicos (Silva e Back, 2000); de rodovias (Mandow e Pérez-de-la-Cruz, 2004); e de transformadores elétricos (Hernandez e Arjona, 2008).

Projeto de sistemas térmicos também tem sido domínio de aplicação de SE. Akagi et al. (1988) desenvolveram um SE para projeto de centrais energéticas, no qual o conhecimento é descrito na forma de orientação a objetos. Embora não ignorem o papel das regras em sistemas desse tipo, os autores não mostram a representação do conhecimento através delas, nem esclarecem como as funções LISP as manipulam. Melli e Sciubba (1997) apresentaram um protótipo de SE chamado COLOMBO para a síntese conceitual de processos térmicos, enquanto que Melli et al. (1992) apresentaram um SE interativo para projeto e otimização de centrais termelétricas chamado SYSLAM, que é capaz de configurar uma planta a partir de uma lista de componentes disponíveis em uma base de dados. Tanto COLOMBO como SYSLAM trabalham com encadeamento reverso, considerando os requisitos do projeto como um efeito e tentando encontrar o que causa (ou seja, plantas) esses efeitos. É uma abordagem alternativa ao encadeamento direto tipicamente associado a tarefas de síntese. Embora em ambos os trabalhos os autores afirmem que seu SE necessita de dados numéricos, não é explicitado o dimensionamento dos componentes, se limitando à geração de diferentes conceitos, mas que não envolvem cogeração com produção de água gelada.

O protótipo SE aqui desenvolvido difere dos trabalhos anteriormente mencionados em pelo menos cinco aspectos:

- i. O domínio é restrito a plantas de cogeração a gás natural ao invés de sistemas térmicos em geral, o que reduz a complexidade e esforço de implementação;
- ii. É utilizado um *shell*, o que permite concentrar esforços no domínio e no desenvolvimento da base de conhecimento, ao invés de se ocupar da programação altamente técnica e laboriosa dos aspectos cognitivos de Sistemas Especialistas. O *shell* escolhido é o CLIPS (CLIPS, 2006);
- iii. O protótipo é capaz de propor soluções mesmo quando alguns dos dados de entrada são incompletos ou desconhecidos;
- iv. O protótipo é capaz de explicar suas decisões, podendo ser utilizado como ferramenta educacional ou de treinamento para engenheiros novatos. Pode ser utilizado também por engenheiros experientes que buscam alternativas de projeto;
- v. O protótipo é capaz de propor diferentes esquemas conceituais e preliminares para um mesmo conjunto de requisitos de projeto, uma abordagem implementada por Silva (1998) para o domínio de sistemas hidráulicos. Essa característica é considerada de particular importância, especialmente na fase de projeto conceitual. Nesta fase, o projetista visa determinar um princípio de solução (Pahl et al., 2007) e um caminho básico de solução que parte dos requisitos de projeto e chegam numa solução final. Assim sendo, quanto mais alternativas de projeto forem geradas na fase de projeto conceitual, melhor o projeto se torna, apesar da tendência de aumento de complexidade do problema, em especial na seleção das diferentes alternativas.

4.2. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO SE

4.2.1. ESCOPO

De acordo com Kingston (2004), é importante analisar a viabilidade de se utilizar SE para resolver um dado problema, porque esses sistemas variam muito com relação aos níveis de complexidade – a quantidade de esforço requerida para implementar um SE comercial pode chegar facilmente a dezenas de milhares de horas de trabalho. Ainda de acordo com o autor, tarefas de síntese (tais como planejamento, configuração e projeto) são tipicamente mais complexas do que as de análise (tais como diagnóstico).

Baseado nesses argumentos e visando reduzir tempo e esforço de implementação, o escopo do protótipo SE é limitado a plantas de cogeração a gás natural, ao invés dos sistemas térmicos/químicos mais genéricos reportados na seção 4.1. Além disso, as utilidades são limitadas a energia elétrica, vapor saturado e água gelada; os acionadores primários, limitados a motores e turbinas; e as máquinas de refrigeração por absorção, limitadas a acionamento a vapor (duplo efeito) ou água quente (simples efeito).

A limitação no escopo permite que o protótipo represente mais adequadamente as informações pertinentes ao domínio do conhecimento. Para tanto, o nível de detalhamento que o protótipo deve representar – sua granularidade – deve ser especificada. No presente trabalho, as funções principais dos componentes, desconsiderando seus detalhes internos, representam essa granularidade. Por exemplo, motores têm como função principal gerar energia elétrica e rejeitar calor. Para os propósitos do protótipo, estas são as funções consideradas, não sendo relevantes detalhes acerca dos aspectos construtivos de tais equipamentos. Por outro lado, informações gerais sobre a aplicação dos componentes e suas especificações técnicas devem ser fornecidas pelo protótipo (Silva, 1998).

4.2.2. FUNÇÕES

As funções do protótipo SE se referem a suas capacidades. Na presente versão, suas principais funções são:

- a. Permitir especificar energia elétrica, vapor saturado e água gelada para fins de condicionamento de ar como demandas energéticas do cliente;
- b. Auxiliar o usuário a consolidar dados da memória de massa;
- c. Manipular dados desconhecidos acerca da demanda de vapor;
- d. Auxiliar o usuário a estimar a vazão de vapor, quando necessário;
- e. Propor diferentes soluções para um mesmo conjunto de requisitos de projeto de plantas de cogeração;
- f. Apresentar os diagramas das plantas de cada uma das soluções, bem como a descrição da solução encontrada, as especificações dos componentes e parâmetros de desempenho da planta proposta;
- g. Explicar as soluções;
- h. Gerar arquivos HTML para cada solução, contendo as informações descritas nos itens *f* e *g*. Esta é uma característica relevante em um cenário organizacional baseado em intranet, pela possibilidade de se gerar menos documentação física e contribuir para um melhor gerenciamento de informações (Silva e Back, 2000);
- i. Comunicar-se com o usuário através de interface gráfica amigável.

4.2.3. ENTRADA DE DADOS: REQUISITOS DE PROJETO

Os requisitos de energia elétrica são informados manualmente ou então definidos automática e acuradamente a partir da memória de massa do cliente, cujos dados são fornecidos pela concessionária local em arquivos no formato de planilhas eletrônicas, sem nenhum tipo de tratamento estatístico. O protótipo possui uma ferramenta auxiliar para

consolidar esses dados. Por outro lado, alguns dos requisitos associados à carga de vapor podem ser incompletos ou desconhecidos (ver seção 3.2). Também aqui há uma ferramenta para auxiliar o usuário a estimar a vazão de vapor a partir do consumo de combustível do cliente, uma prática bastante comum. Ambas as ferramentas auxiliares são apresentadas em mais detalhes adiante, na seção 4.2.6.3. Já a carga de água gelada é informada seja através de uma demanda média diária ou através de um perfil de carga térmica ao longo de um dia. O quadro completo dos dados de entrada do protótipo é mostrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1. Dados de entrada do protótipo.

Demanda	Requisito	Descrição
Energia elétrica	Regime	Operação na base (24 h/dia, 7 dias/semana) ou na ponta (3 h/dia, 5 dias/semana)
	Demanda máxima (kW)	Máxima demanda observada no perfil de demanda
	Demanda mínima (kW)	Mínima demanda observada no perfil de demanda
	Energia consumida (kWh)	Integral do perfil de demanda ao longo do período considerado (Eq. 3.1a)
Vapor saturado	Pressão (bar)	Pressão requerida pela aplicação de vapor saturado (manométrica)
	Vazão (kg/s)	Vazão requerida; em geral é um dado desconhecido em instalações existentes, sendo 2,78 kg/s um valor típico
	Taxa de retorno de condensado	Expressa a quantidade de vapor consumida no processo, sendo 0,8 um valor típico
	Temperatura do condensado (°C)	Temperatura com o qual o condensado deixa o processo, normalmente por volta de 60 °C
Água gelada	Carga térmica (kW)	Carga térmica demandada pelo ambiente a ser condicionado

4.2.4. ESTRUTURA FUNCIONAL

A estrutura funcional do protótipo baseia-se fundamentalmente nos requisitos de projeto do SE e nas técnicas de representação de conhecimento consideradas. Seu principal componente é o *shell*, que é o elemento que contém o motor de inferência. A escolha do *shell* deve levar em conta a cadeia de inferência (encadeamento direto ou reverso) e a forma de representação do conhecimento (regras, funções, orientação a objetos). Considerando-se que o conhecimento relacionado ao projeto de plantas de cogeração é representado fundamentalmente na forma de regras e orientação a objetos e que problemas de síntese

apresentam naturalmente encadeamento direto, o *shell* escolhido é o CLIPS (CLIPS, 2006). Originalmente desenvolvido pela Divisão de Engenharia de Software da Agência Espacial dos EUA, o CLIPS é, hoje em dia, um software de domínio público mantido independentemente. É um *shell* de encadeamento direto baseado na arquitetura de casamento de padrões (*pattern-matching*) (Gonzalez e Dankel, 1993), no qual o conhecimento pode ser representado na forma de regras, funções e orientação a objetos. Essa última está disponível em um módulo chamado COOL²², o qual permite a aplicação dos princípios fundamentais da orientação a objetos (abstração, herança, polimorfismo e encapsulamento).

A estrutura funcional do protótipo é apresentada na Figura 4.1. O usuário se comunica com o sistema através de interface gráfica implementada em Delphi. Os dados de entrada são os requisitos de projeto apresentados na seção anterior, fornecidos pelo usuário. Tais dados são processados pelo motor de inferência contido no componente CLIPS OCX, que permite que comandos e outras estruturas do CLIPS sejam integrados ao código Delphi da interface. A partir dos dados de entrada e do conhecimento devidamente representado e armazenado na base de conhecimento (detalhada na próxima seção), o processo de inferência é executado até que uma conclusão seja atingida. Nesse ponto tem-se então uma solução, que é exportada pelo motor de inferência no formato HTML. Através do componente *web browser*, o arquivo HTML é exibido para o usuário na interface gráfica.

²² CLIPS *Object-Oriented Language*

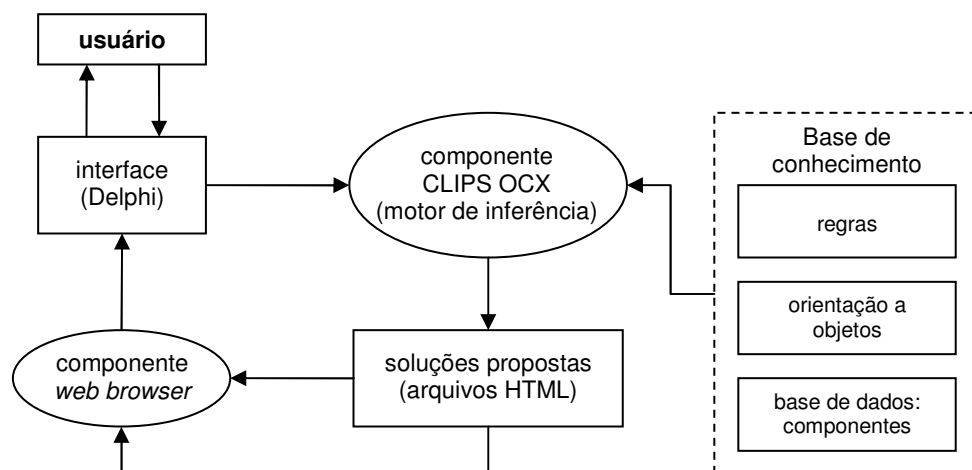


Figura 4.1. Estrutura funcional do protótipo SE.

4.2.3. BASE DE CONHECIMENTO

A base de conhecimento é implementada através de representações baseadas em orientação a objetos e regras. A modelagem por orientação a objetos não só se mostra adequada para representar e manipular atributos e procedimentos (ver seção 2.2.1) como permite modelar o conhecimento de modo muito próximo ao modelo físico de uma planta de cogeração. Esse modelo é construído com base no conhecimento adquirido do especialista.

Na Figura 4.2 são evidenciadas as relações entre as classes *Concessionária*, *PlantaDeCogeração* e *Carga*. Para representar classes e suas relações a linguagem UML²³ é adotada, por ser bem documentada e por ser utilizada em diversos outros trabalhos (p. ex., Willard, 2007). A primeira corresponde às utilidades que a planta necessita para seu funcionamento, tais como água, gás e energia elétrica (subclasses de *Concessionária*). A última se refere às demandas de energia que a planta deve atender – vapor, água gelada e energia elétrica (subclasses de *Carga*).

²³ UML (2007) The Unified Modeling Language. Object Management Group. Disponível em: <<http://www.uml.org>>.

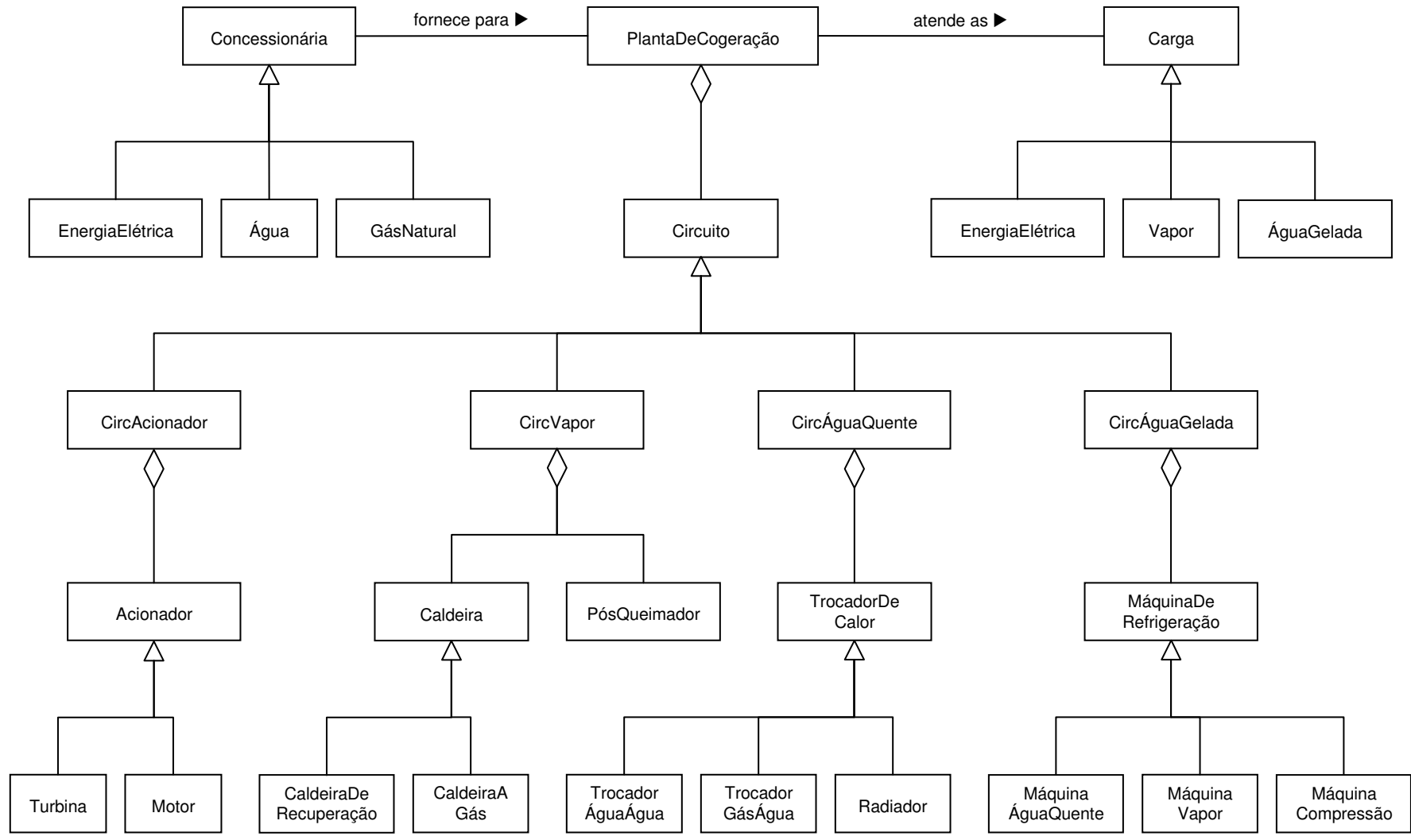


Figura 4.2. Representação através de orientação a objetos de uma planta.

Note que o modelo continua útil para versões futuras do protótipo, onde mais cargas térmicas (água quente) ou novas tecnologias (células-combustível) podem ser incluídas. Para tanto, basta que sejam acrescentadas classes *ÁguaQuente* e *CélulaCombustível* como subclasses de *Carga* e *Acionador*, respectivamente. Pode-se ver ainda na Figura 4.2 que a classe *PlantaDeCogeração* se relaciona com a classe *Circuito*, sendo essa uma relação do tipo *todo-parte*, ou seja, uma planta de cogeração é composta por diferentes circuitos. As relações do tipo *é-um*²⁴ representam relações de herança entre as classes. Essas relações entre a classe *Componente* e suas subclasses foram omitidas para preservar a clareza da figura.

Um conjunto pré-determinado de regras é o núcleo da base de conhecimento do protótipo. As regras são obtidas a partir da representação do conhecimento de especialistas mostrado no Capítulo 3. Uma possível representação de uma regra que selecione o circuito acionador motor-gerador é mostrada esquematicamente na Figura 4.3.

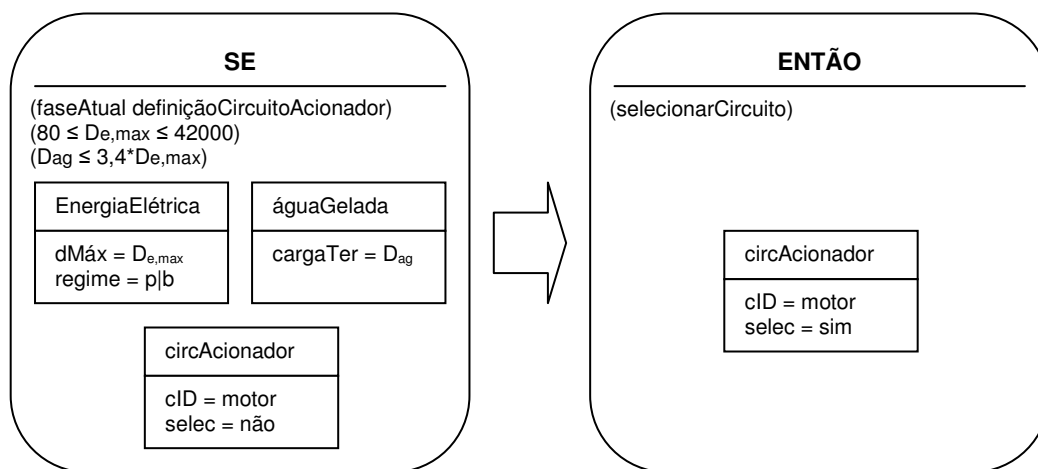


Figura 4.3. Esquema de uma regra para seleção do circuito acionador baseado em motor.

²⁴ Na Figura 4.2, as relações entre classes do tipo *todo-parte* são representadas por losangos, enquanto que as relações do tipo *é-um* são representadas por triângulos.

Três dos seis condicionantes dessa regra são objetos. A ação da regra é manipular o atributo `selecionado` do objeto `circuitoAcionador`, mudando seu valor de `não` para `sim` através de um procedimento específico de seleção de moto-geradores.

Da mesma forma, várias outras regras são criadas para representar o conhecimento adquirido. Como existem cerca de cinquenta regras, elas não são todas apresentadas (algumas das principais regras podem ser encontradas no Apêndice B). A cada uma das etapas do projeto descritas no capítulo 3 (ver Fig. 3.1) são associados blocos de regras. Apesar da natureza essencialmente não estruturada de SE's, esse agrupamento traz ao protótipo características estruturais²⁵, já que há uma seqüência de etapas a ser seguida. Isso exige algum controle sobre o fluxo de informações do protótipo, o que é garantido pela existência de uma regra central de controle que manipula fatos de controle (Figura 4.4). Um exemplo de fato de controle é o primeiro condicionante da regra representada na Figura 4.3.

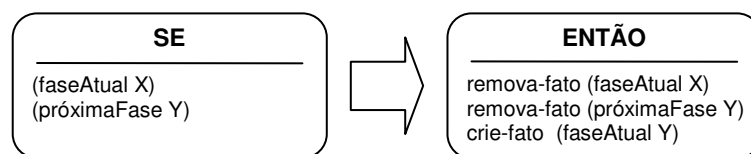


Figura 4.4. Controle do fluxo de informações do protótipo SE.

Assim, enquanto houver, por exemplo, um fato de controle associado à definição dos circuitos acionadores, apenas as regras desse bloco poderão ser processadas. À regra central cabe identificar o fim de cada etapa, fazendo com que o fato da fase concluída deixe de existir ao mesmo tempo em que cria o fato de controle associado à nova etapa. Importa ressaltar que a seqüência de etapas não é fixa, já que a etapa de definição de circuitos de

²⁵ De fato, Giarratano e Riley (1994) afirmam que a maior parte dos SE's possuem algumas características estruturais.

recuperação de calor não deve ser conduzida se não houver requisito de cargas térmicas, por exemplo. Esse controle também fica a cargo da regra central.

4.2.6. INTERFACE

4.2.6.1. Dados de entrada: requisitos de projeto

Na Figura 4.5 é mostrada a janela utilizada para informar os requisitos de energia elétrica descritos na Tabela 4.1.

New Plant Design

Electricity | Steam | Chilled Water

Plant operation

Base load (24 h/day; 7 days/week) On peak (3 h/day; 5 days/week)

Daily power requirements

Maximum power demand (kW)

Minimum power demand (kW)

Energy consumption (MWh)

Import power requirements from Load Curve File (LCF)

D:\SubversionProSisC\

Preview file Browse file

==== Errors =====

1: You must inform the Maximum power demand.
2: You must inform the Minimum power demand.
3: You must inform the Energy consumption.

Open results in a new tab

OK Cancel Reset

Figura 4.5. Janela para entrada de dados.

Requisitos sobre as demandas de vapor e água gelada são informadas em janelas similares à mostrada na Figura 4.5. As informações manipuladas através dessas janelas estão associadas às quatro primeiras funções descritas na seção 4.2.2 (especificar demandas energéticas; auxiliar a consolidação de dados da memória de massa; manipular dados desconhecidos acerca da demanda de vapor; auxiliar a estimar a vazão de vapor). Todas essas funções manipulam informações das instâncias das subclasses de *Carga* (*Energia elétrica*, *Vapor* e *ÁguaGelada*). Assim, ao ser informada a demanda máxima, esse valor é armazenado no atributo *demandaMaxima* do objeto *Energia elétrica*. Esse objeto, por sua vez, é condicionante de algumas regras, como a mostrada Na Figura 4.3.

4.2.6.2. Dados de saída: soluções propostas

Para cada solução encontrada é gerado um arquivo HTML, onde são apresentados o diagrama proposto, uma descrição dele e uma justificativa para a sua escolha, bem como as especificações dos componentes principais. Na interface gráfica, o arquivo HTML é mostrado em um componente *web browser* (Figura 4.6). Para efeito de clareza, a Figura 4.7 mostra uma transcrição de um arquivo HTML.

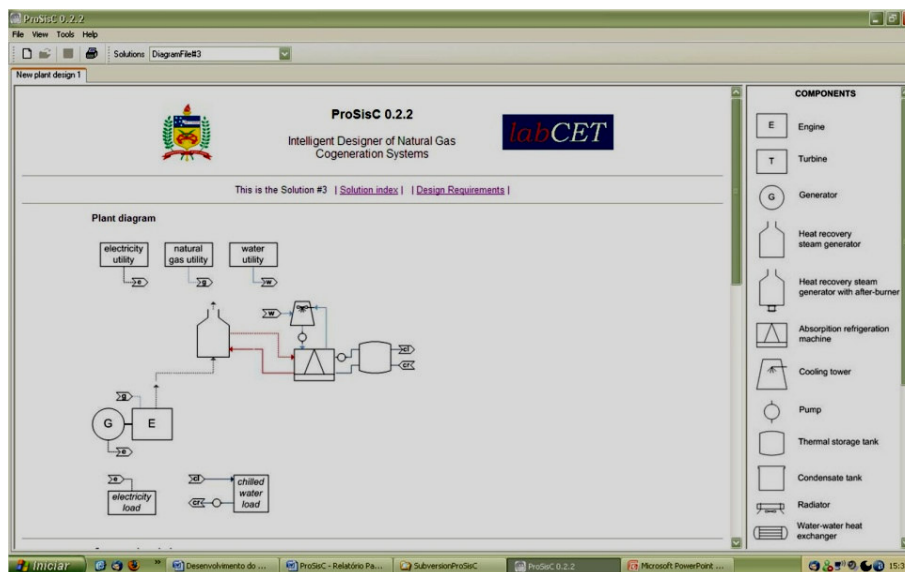


Figura 4.6. Visualização de uma solução na interface gráfica.

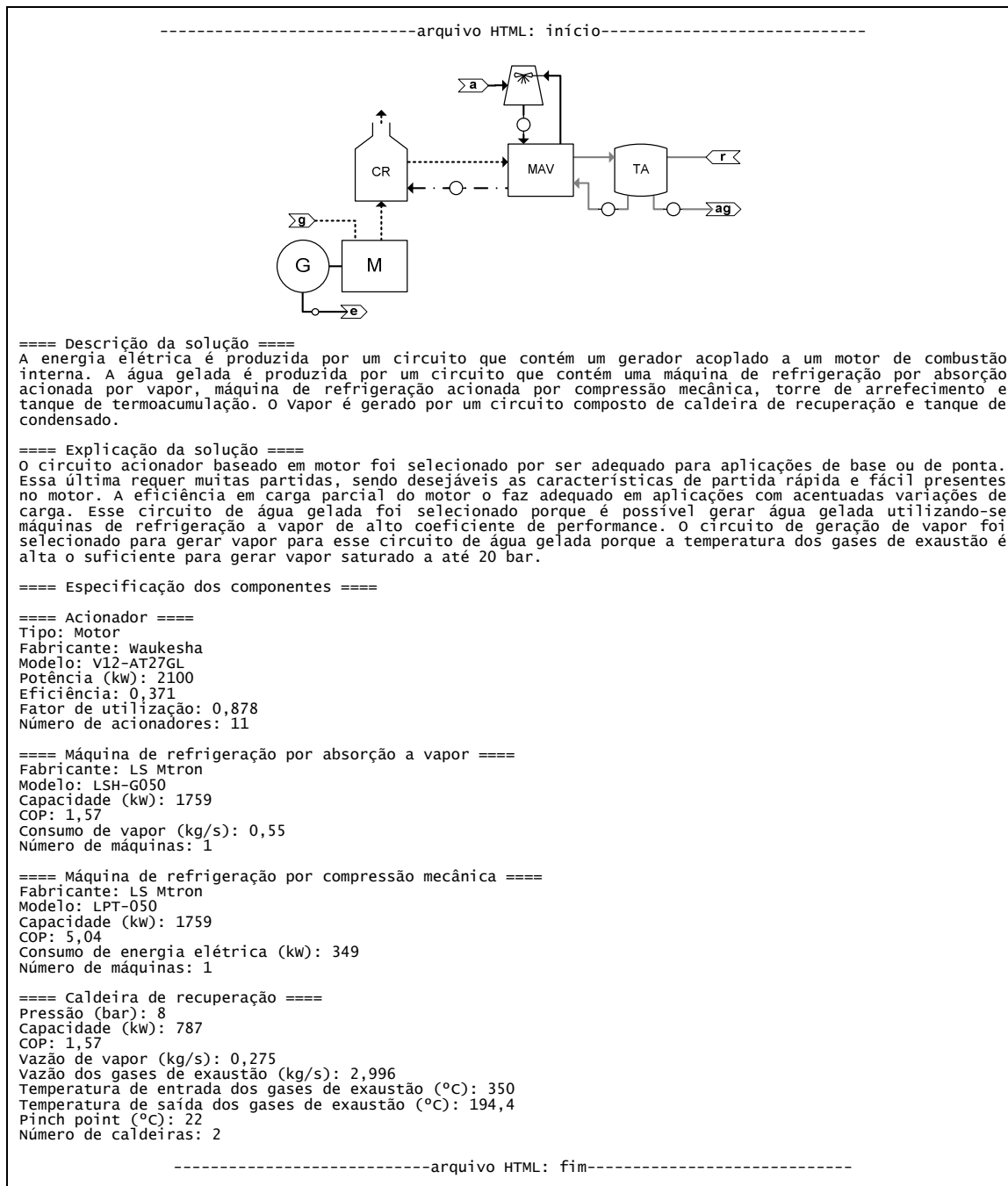


Figura 4.7. Uma solução transcrita de um arquivo HTML.

As especificações de alguns componentes adotadas no presente trabalho e mostradas na Figura 4.7, tais como eficiência e COP, são baseadas em dados fornecidos pelos fabricantes.

4.2.6.3. Funções adicionais

Uma funcionalidade adicional do protótipo é a ferramenta para consolidação dos dados da planilha da memória de massa fornecida pela concessionária. Na Figura 4.8 é mostrada a memória de massa do Aeroporto Internacional Augusto Severo, em Natal, RN. O período de coleta de dados foi do dia 12/08 a 14/10/2005.

Reg.	Data	Hora	kW	C1	kvarIND	C2	kvarCAP	C3	SH	SR	FPot.	DCR	UFER
3	12/08	08:45	911	253	324	90	0	0	F	L	94 L		
6	12/08	09:00	936	260	342	95	0	0	F	L	94 L		
9	12/08	09:15	950	264	349	97	0	0	F	L	94 L		
12	12/08	09:30	950	264	338	94	0	0	F	L	94 L		
15	12/08	09:45	947	263	338	94	0	0	F	L	94 L		
18	12/08	10:00	958	266	342	95	0	0	F	L	94 L		
21	12/08	10:15	947	263	331	92	0	0	F	L	94 L		
24	12/08	10:30	958	266	342	95	0	0	F	L	94 L		
27	12/08	10:45	958	266	328	91	0	0	F	L	95 L		
30	12/08	11:00	968	269	335	93	0	0	F	L	95 L		
33	12/08	11:15	972	270	349	97	0	0	F	L	94 L		
36	12/08	11:30	1195	332	464	129	0	0	F	L	93 L		
39	12/08	11:45	1267	352	468	130	0	0	F	L	94 L		
42	12/08	12:00	1246	346	457	127	0	0	F	L	94 L		
45	12/08	12:15	1228	341	468	130	0	0	F	L	93 L		
48	12/08	12:30	1210	336	457	127	0	0	F	L	94 L		
51	12/08	12:45	1195	332	454	126	0	0	F	L	93 L		
54	12/08	13:00	1192	331	454	126	0	0	F	L	93 L		
57	12/08	13:15	1195	332	446	124	0	0	F	L	94 L		
60	12/08	13:30	1199	333	436	121	0	0	F	L	94 L		

Figura 4.8. Memória de massa do Aeroporto Internacional Augusto Severo (Natal, RN).

Em geral, a memória de massa se refere a um período de 30 dias. Para consolidar esses dados na forma de um perfil diário de demanda, toma-se a mediana das leituras de cada hora. A mediana é mais robusta do que a média, pois não é tão sensível a dados extremos que podem ser facilmente encontrados em memórias de massa. A mediana de uma série de n dados é calculada de acordo com a Eq. 4.1.

$$(4.1a)$$

(4.1b)

O resultado da consolidação dos dados de memória de massa é apresentado na Figura 4.9.

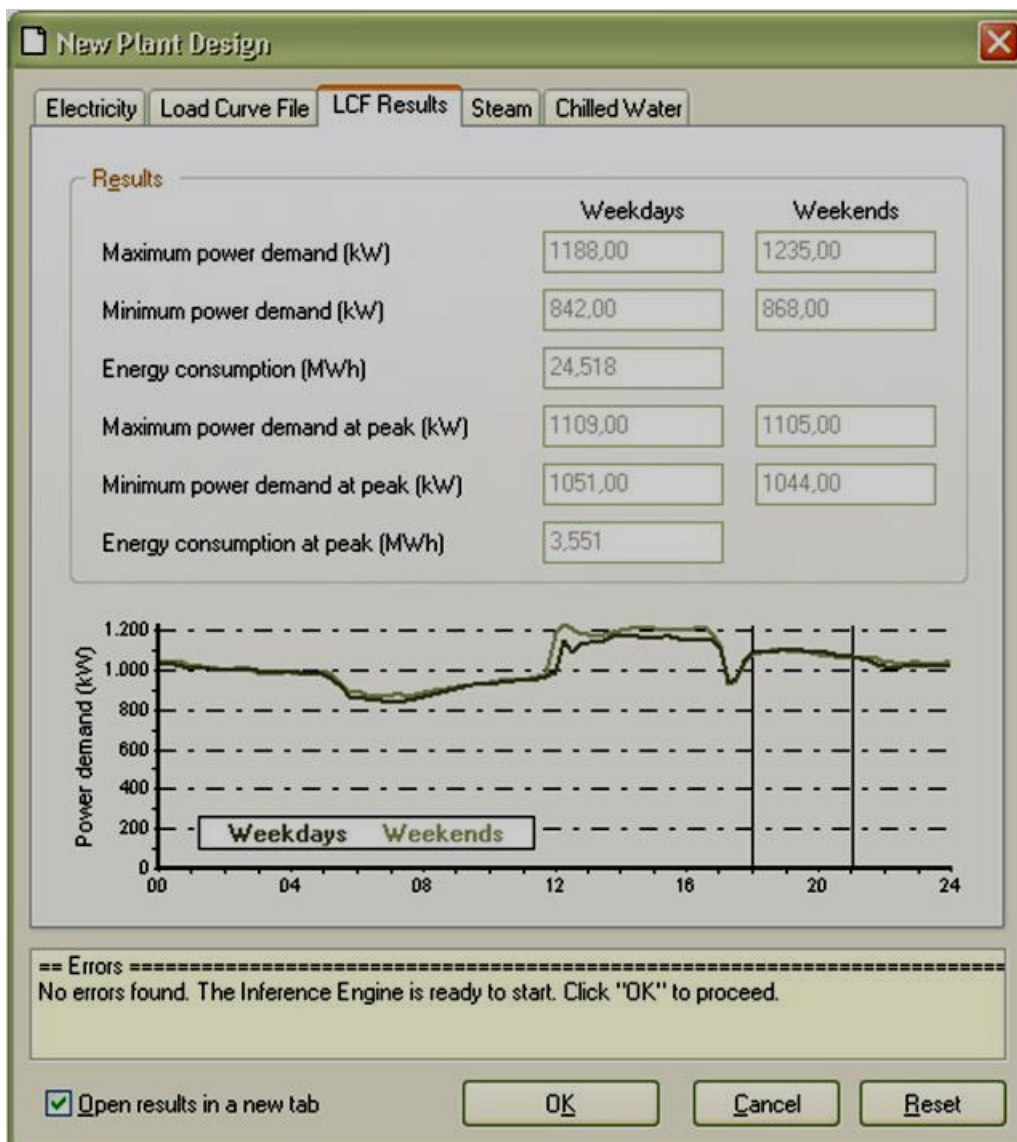


Figura 4.8. Dados da memória de massa consolidados pelo protótipo.

Outra funcionalidade que o protótipo oferece é a possibilidade de se estimar a vazão de vapor a partir do consumo de combustível do cliente. Essa ferramenta é ativada se a vazão de vapor não é conhecida (Figura 4.10).

The screenshot shows a software window titled "New Plant Design" with three tabs: "Electricity", "Steam", and "Chilled Water". The "Steam" tab is active. It contains several input fields and checkboxes:

- No steam
- Steam requirements**
 - Pressure (bar): 8
 - Flow (t/h): ?
 - Condensate returning rate (%):
 - Condensate returning temperature (°C):
 - I do not know the steam flow
 - I do not know the rate
 - I do not know the temperature
- Steam flow**
 - Fuel used on the steam boiler: Heavy oil (dropdown), LHV: 43800
 - Monthly fuel consumption (kg per month): 12000
- Boiler operation**
 - 12 (dropdown) hours per day
 - (dropdown) days per week
 - I do not know anything of these

An error message box is open, displaying the following text:

```
== Errors ==
1: You must inform the Maximum power demand.
2: You must inform the Minimum power demand.
3: You must inform the Energy consumption.
```

At the bottom, there is a checkbox for "Open results in a new tab" (checked), and buttons for "OK", "Cancel", and "Reset".

Figura 4.9. Ferramenta para estimativa da vazão de vapor.

A partir do estado termodinâmico do vapor, do consumo mensal médio de combustível (estimado a partir de notas fiscais de compra) e do regime de operação da caldeira, o protótipo calcula a vazão estimada de vapor a partir da Eq. 4.2.

$$(4.2)$$

4.2.7. VERIFICAÇÃO E VALIDAÇÃO

O desenvolvimento do protótipo SE aqui apresentado faz parte de um projeto²⁶ de pesquisa financiado pela FINEP e pela Petrobras. As metas desse projeto são diferentes versões validadas do protótipo com incrementos de funcionalidade. Os relatórios de acompanhamento do projeto exigidos pelos financiadores mostram em detalhes os processos de verificação e validação (p. ex., Matelli et al., 2008a) e evidenciam a interação com o especialista durante os ciclos de aquisição, representação, implementação e validação do desenvolvimento incremental do protótipo. Esses ciclos não são triviais, fazendo com que seja consumido muito tempo entre os incrementos de funcionalidade. A evolução das principais funcionalidades do protótipo SE é mostrada na Tabela 4.2.

Tabela 4.2. Evolução do protótipo SE

Etapa #	Funcionalidades acrescentadas	Disponível para validação em
0 (inicial)	Soluções alternativas, cargas EE e VS	Julho/2006
1	Interface gráfica, dimensionamento	Agosto/2007
2	Otimização	Dezembro/2007
3	Cargas EE, VS e AG	Fevereiro/2008

* EE: energia elétrica, VS: vapor saturado, AG: água gelada.

Cada nova versão do protótipo foi verificada pelo engenheiro de conhecimento antes de ser submetida ao especialista para validação. A metodologia adotada foi uma lista de verificação. Para cada conjunto de entrada de dados, a lista contém as saídas de dados esperadas e assim se verificava se o protótipo reproduziria as saídas previstas.

A cada nova funcionalidade acrescentada ao protótipo, sessões de validação foram conduzidas conjuntamente com o especialista. Caso o especialista concordasse com as soluções apresentadas pela nova versão do protótipo, esta era considerada validada e operacional. Do contrário, o protótipo deveria ser reprogramado de modo a eliminar os erros apontados e novamente submetido para validação do especialista. Esse ciclo se

²⁶ O projeto estava em andamento durante a redação deste trabalho.

repetia até que o especialista concordasse com as soluções apresentadas pelo protótipo. Para ilustrar esse processo, apresenta-se a seguir um caso submetido para validação que previa apenas energia elétrica como requisito de projeto, como mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3. Caso apresentado para validação.

Demanda	Requisito	Valor
Energia elétrica	Regime	Ponta
	De,max (kW)	5500
	De,min (kW)	2220
	Ce (kWh)	60000
Vapor saturado	Não requerido	--
Água gelada	Não requerida	--

Na ocasião da sessão de validação, o protótipo SE inferiu não ser possível encontrar uma solução tecnicamente viável, explicando que turbinas não são aplicáveis em situações de partidas sucessivas e que motores não devem operar com cargas inferiores a 50% (o que ocorreria ao atender a demanda mínima). O especialista concordou com a explicação referente à turbina, mas não com relação ao motor, explicando que *há a possibilidade de se modularizar a instalação em, por exemplo, dois motores de 3000 kW, ao invés de um de 6000 kW. Para demandas inferiores a 3000 kW, apenas um dos motores opera, garantindo que sua carga seja maior que 50%. Isso faz com que a operação da planta seja mais flexível.* Assim, esse novo conhecimento, junto com outros advindos da mesma sessão, é implementado no protótipo, que é reapresentado em nova sessão. Esse processo foi repetido até que o especialista julgasse que as respostas eram satisfatórias.

4.3. OBSERVAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentado o desenvolvimento do protótipo SE para projeto de plantas de cogeração, com base no conhecimento descrito no capítulo 3. O protótipo foi descrito em termos de escopo, funções e base de conhecimento. No próximo capítulo é abordado o desenvolvimento do protótipo RBC.

5. DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO RBC

O desenvolvimento do protótipo RBC para projeto de plantas de cogeração é apresentado nesse capítulo. A revisão da literatura vista no capítulo anterior é complementada aqui com uma revisão de sistemas de raciocínio baseado em casos aplicados a domínios similares ao desenvolvido no presente trabalho, já que o uso de sistemas desse tipo em projeto de plantas de cogeração é considerado inédito. Os fundamentos do raciocínio baseado em casos e a implementação de um protótipo são também abordados.

5.1. RBC APLICADOS EM PROJETOS DE ENGENHARIA

A abordagem típica de um problema através de SE apresenta algumas limitações, especialmente no que se refere à manutenção da base de conhecimento e ao aprendizado a partir de experiências anteriores (Vargas e Raj, 1993). RBC é uma técnica de SBC que pode contornar essas limitações. Ao longo dos últimos anos, RBC se tornou uma das mais atrativas técnicas da IA (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Basicamente, RBC resolve um problema através da recuperação de uma solução encontrada para uma situação similar. Mais especificamente, RBC utiliza casos previamente conhecidos, de tal modo que um novo problema é resolvido baseado na hipótese de que problemas similares possuem soluções similares. A solução similar pode ser aplicada parcial ou integralmente no novo problema. A nova solução é então revisada e corrigida (se necessário) e então pode ser armazenada em uma base de casos para uso futuro, caracterizando assim o aprendizado a partir de experiências anteriores.

A necessidade de se construir uma base de casos é uma limitação em RBC estudada por Finnie e Sun (2003). Outra limitação potencial é a necessidade de conhecimento genérico sobre o domínio (em contraposição ao conhecimento específico contido nos

casos) para dar suporte às fases do ciclo RBC: recuperação, reutilização, revisão e retenção dos casos (ver Figura 2.3). Esse suporte pode ser inexistente ou crucial, sendo que um conjunto de regras pode fazer o papel do conhecimento genérico sobre o domínio (Aamodt e Plaza, 1994).

A aplicação de RBC em problemas de projeto de engenharia similares ao domínio da cogeração pode ser encontrada principalmente na área de engenharia química. Avramenko e Kraslawski (2006) abordam o uso de RBC para projeto de sistemas de destilação, bem como para formulação de gorduras e óleos. Argumentam que a abordagem via RBC é adequada para problemas complexos, freqüentemente incompletos e incertos, e que envolvem diferentes estruturas de representação. Seuranen et al. (2005) apresentam uma abordagem alternativa, baseada em RBC, aos métodos de programação linear normalmente utilizados para resolver problemas de misturas multicomponentes, cujo número de métodos de separação pode crescer fatorialmente. López-Arévalo et al. (2007) propõem uma abordagem via RBC para tratar a complexidade envolvida em reprojeto ou modificações de processos químicos, gerando representações alternativas de processos químicos existentes. Avramenko et al. (2004) utilizam-se de RBC para projeto de colunas de destilação reativas, considerado mais complexo do que o projeto de reatores individuais e colunas convencionais. Kraslawski et al. (1995) desenvolveram um protótipo RBC para seleção de equipamentos para mistura. Em comum a todos esses trabalhos, há a alta complexidade envolvida nos domínios abordados. Tal como em projeto de plantas de cogeração, tal complexidade está associada principalmente à necessidade de se combinar componentes que trocam energia e fluídos.

5.2. FUNDAMENTOS DO RBC

Uma vez que o objetivo do RBC é reutilizar soluções no contexto de um novo problema, a escolha de casos em uma base que podem ser usados para efetivamente

resolvê-lo é uma questão fundamental nessa técnica de IA (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Conseqüentemente, se exige uma medida do quanto um dado caso é similar ao problema. Essa medida é chamada de similaridade. Para ser calculada, é preciso que os casos sejam adequadamente representados. Um caso apresenta, tipicamente, a descrição de uma situação (problema) e a experiência retida durante sua resolução (solução). Assim sendo, o caso é uma associação de dois conjuntos de informação, um referente ao problema e outro, à solução (Wangenheim e Wangenheim, 2003). Na Figura 5.1 é ilustrado um exemplo de um caso pertencente a uma base de casos de plantas de cogeração (Matelli et al., 2007).

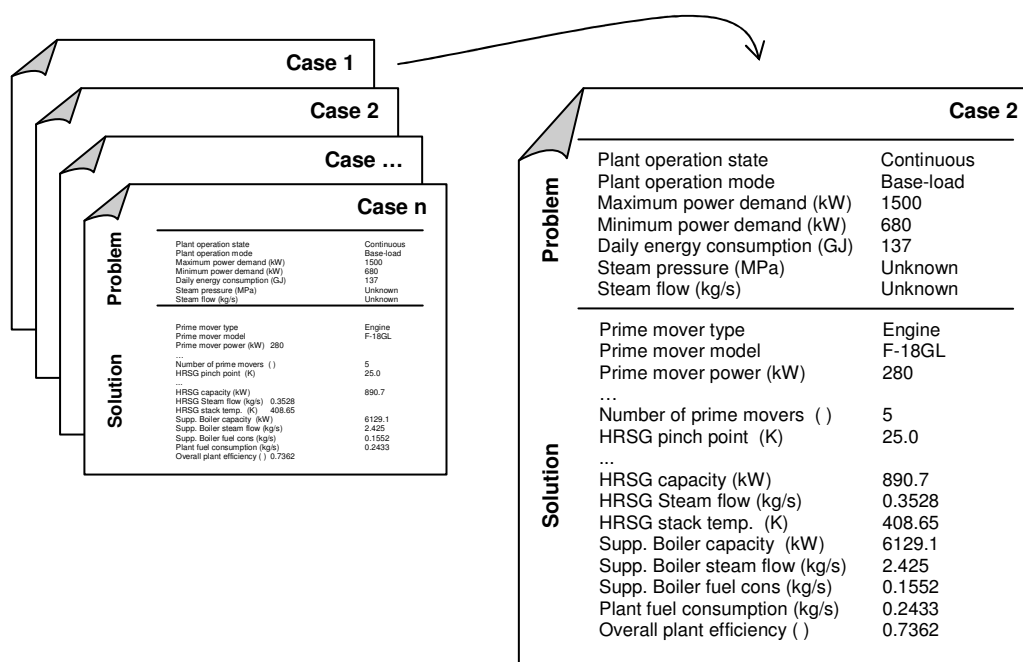


Figura 5.1. Um caso pertencente a uma base de casos.

As definições apresentadas a seguir são encontradas no trabalho de Kraslawski et al. (1995). Um caso é uma instância C_i de uma base de dados, na qual $i = 1, n$ é um caso particular. Cada instância C_i é caracterizada por atributos X_j , com $j = 1, m$ sendo um atributo particular. O novo problema P é também caracterizado por atributos X_j , mas $j = 1, p$, e normalmente $p \neq m$. O sistema RBC deve então encontrar um conjunto de

casos C_i próximos de P , proximidade esta mensurada por métrica definida no espaço m -dimensional: quanto menor a distância entre C_i e P , maior a similaridade entre eles. Para um dado atributo X_j , a medida da distância entre o novo problema P e um caso C_i é baseada na r -métrica de Minkowski d , dada pela Eq. 5.1.

$$d(P,C_i)_j = \left(\int_{-\infty}^{+\infty} |P(X_j) - C_i(X_j)|^r dX_j \right)^{\frac{1}{r}} \quad (5.1)$$

Dependendo do valor de r , funções de distância conhecidas são criadas, tais como distância de Hamming ($r = 1$), euclideana ($r = 2$) ou de Chebyshev ($r = \infty$). As duas primeiras são amplamente utilizadas em aplicações de RBC (Wangenheim e Wangenheim, 2003; Avramenko e Kraslawski, 2006). A visualização geométrica da função de Hamming é mostrada no exemplo da Figura 5.2, onde um espaço 2-D contém dois casos, C_1 e C_2 , relacionados a um problema P . As dimensões X_1 e X_2 representam os atributos *demanda de vapor* e *demanda de energia elétrica*, respectivamente. Ao se aplicar a função de Hamming nesse espaço 2-D, a distância entre cada atributo X_j do problema e dos casos é determinada. A distância entre o caso e o problema é a soma da distância entre os atributos, como mostrado na Eq. 5.2.

$$d(P,C_i) = \sum_{j=1}^n d(P,C_i)_j = \sum_{j=1}^n |P(X_j) - C_i(X_j)| \quad (5.2)$$

Assim, as distâncias entre o problema P e os casos C_1 e C_2 são, respectivamente

$$d(P,C_1) = |P(X_1) - C_1(X_1)| + |P(X_2) - C_1(X_2)| = 10500 \quad (5.3a)$$

$$d(P,C_2) = |P(X_1) - C_2(X_1)| + |P(X_2) - C_2(X_2)| = 7000 \quad (5.3b)$$

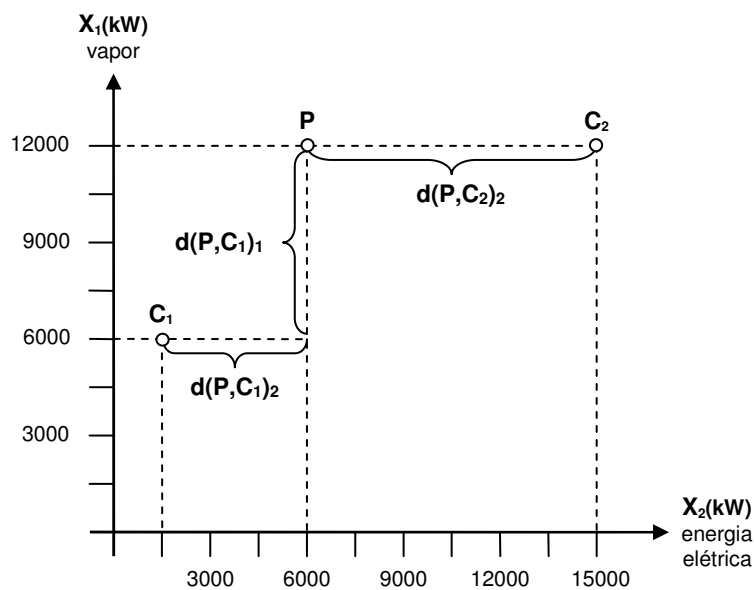


Figura 5.2. Distância entre problema e casos em um espaço 2-D.

As distâncias calculadas através da Eq. 5.2 são medidas absolutas da similaridade. É mais conveniente normalizá-las em um intervalo entre 0 e 1, sendo que 0 significa total dissimilaridade e 1 total similaridade. Para atributos numéricos, a função linear de similaridade (Eq. 5.4) dá uma medida normalizada apropriada da similaridade entre $P(X_j)$ e $C_i(X_j)$. Para atributos que não permitem valores intermediários (por exemplo, operação na base ou na ponta), a similaridade é 1 se $P(X_j)$ e $C_i(X_j)$ forem exatamente iguais; caso contrário, a similaridade é 0, como pode ser visto na Eq. 5.5.

$$\text{locsim}[P(X_j), C_i(X_j)] = 1 - \frac{|P(X_j) - C_i(X_j)|}{\max(X_j) - \min(X_j)} \quad (5.4)$$

$$\text{locsim}[P(X_j), C_i(X_j)] = \begin{cases} 1, & P(X_j) = C_i(X_j) \\ 0, & P(X_j) \neq C_i(X_j) \end{cases} \quad (5.5)$$

As Eqs. 5.4 e 5.5 se referem à similaridade local, isto é, a similaridade entre um atributo do problema e o mesmo atributo de um caso. Para se calcular a similaridade entre todos os atributos do caso e do problema – o que se conhece por similaridade global –

todas as similaridades locais são consideradas. Note que o cálculo das similaridades locais não expressa a importância relativa dos atributos, já que em projeto de plantas de cogeração existem atributos que são mais importantes que outros (por exemplo, o regime de operação da planta é mais importante que a temperatura de retorno de condensado). Isso é contornado atribuindo-se pesos aos atributos: quanto maior o peso w_j de um atributo X_j , maior sua contribuição na similaridade global. Como a determinação da importância relativa dos atributos envolve conhecimento especializado sobre o domínio, os pesos devem ser atribuídos por especialistas. A similaridade global é calculada pela média ponderada das similaridades locais, como mostra a Eq. 5.6.

$$\text{sim}[P, C_i] = \frac{\sum_{j=1}^n w_j \cdot \text{locsim}[P(X_j) - C_i(X_j)]}{\sum_{j=1}^n w_j} \quad (5.6)$$

O caso que apresentar o maior valor de $\text{sim}[P, C_i]$ é reutilizado para gerar uma solução. De acordo com Watson (1997), em muitas circunstâncias isso é suficiente para se obter uma solução para o problema. Esse não é o caso, entretanto, em projeto de plantas de cogeração. O protótipo RBC deve adaptar a solução recuperada às necessidades do problema. Entre os diversos métodos de adaptação disponíveis, a técnica de ajuste dos parâmetros se adapta bem ao projeto de plantas de cogeração, porque nela se comparam parâmetros específicos do caso recuperado e do problema, aplicando-se regras de adaptação ou fórmulas diretamente no caso recuperado, de modo a gerar a solução final. Como é de praxe em metodologias de SBC, a solução deve ser validada e, caso não sejam necessárias correções, armazenada na base de casos.

5.3. DESCRIÇÃO DO PROTÓTIPO RBC

5.3.1. ESCOPO

Da mesma forma que no protótipo SE, o escopo do protótipo RBC é limitado a plantas de cogeração a gás natural. As utilidades são limitadas a energia elétrica, vapor saturado e água gelada; os acionadores primários, limitados a motores e turbinas; e as máquinas de refrigeração por absorção, limitadas a acionamento a vapor (duplo efeito) ou água quente (simples efeito).

5.3.2. FUNÇÕES

As principais funções do protótipo RBC são:

- a. Permitir especificar energia elétrica, vapor saturado e água gelada para fins de condicionamento de ar como demandas energéticas do cliente;
- b. Manipular dados desconhecidos acerca da demanda de vapor;
- c. Apresentar a descrição da solução encontrada, as especificações dos componentes e parâmetros de desempenho da planta proposta;
- d. Armazenar a solução encontrada na base de casos para futura referência;
- e. Comunicar-se com o usuário através da interface padrão do CLIPS.

5.3.3. ESTRUTURA FUNCIONAL

A estrutura funcional do protótipo RBC é baseada no CLIPS. Embora haja *shells* específicos para RBC, optou-se, no presente trabalho, pela implementação via CLIPS para fazer com que a integração das técnicas SE/RBC ocorra na mesma linguagem. Além disso, o CLIPS permite a manipulação de regras necessárias para a adaptação da solução. Na Figura 5.3 é ilustrada a estrutura funcional do protótipo RBC.

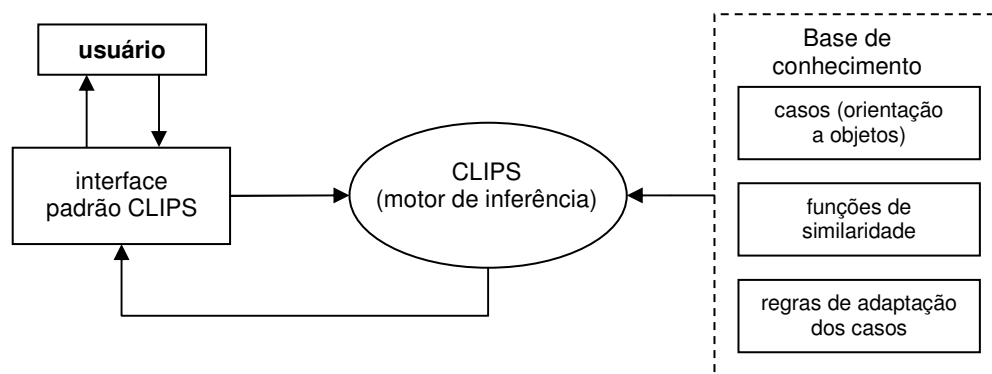


Figura 5.3. Estrutura funcional do protótipo RBC.

A ausência da interface gráfica faz com que a estrutura funcional do protótipo RBC seja mais simples do que a do protótipo SE. Por outro lado, o usuário fica limitado pela interface padrão do CLIPS, que suporta apenas elementos de texto.

5.3.4. BASE DE CONHECIMENTO

Os elementos mais importantes da base de conhecimento de um sistema RBC são, naturalmente, os casos. Aqui, são modelados como instâncias de uma classe *Caso*, na qual seus atributos são aqueles X_j discutidos anteriormente, e seu procedimento suas funções de cálculo de similaridade. As funções de similaridade calculam a similaridade local de todos os atributos para cada caso (Eqs 5.4 e 5.5). A classe *Caso* é ilustrada na Figura 5.4. Note como seus atributos são separados em atributos associados ao problema e em atributos associados à solução. Como são muitos os atributos dessa classe, por simplicidade apenas alguns são mostrados. A lista completa dos atributos é mostrada no Apêndice C.

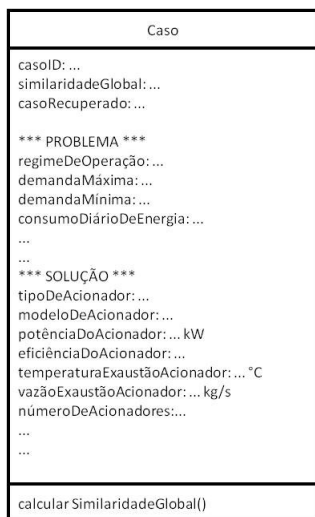


Figura 5.4. Classe *Caso* e alguns de seus atributos.

Além dos casos, a base de conhecimento do protótipo RBC possui um conjunto de regras, agrupadas em blocos, que faz com que o CLIPS emule as etapas do ciclo RBC mostrado na Figura 2.3. De modo semelhante ao protótipo SE, uma regra central controla a execução do ciclo RBC, como mostrado na Figura 5.5.

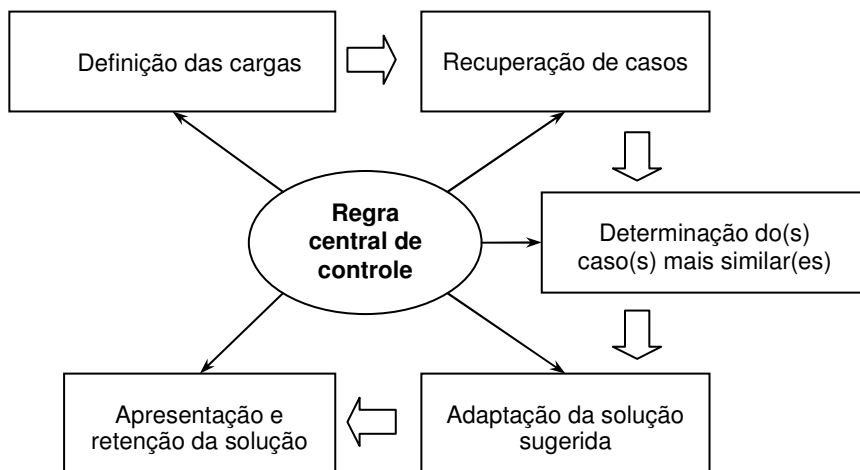


Figura 5.5. Controle do fluxo de informações do protótipo RBC.

As etapas apresentadas na Figura 5.5 são descritas a seguir:

- a. Definição de cargas: são manipulados os dados de entrada de modo a criar uma nova instância, chamada *problema*, da classe *Caso*. Os atributos da instância *problema* são utilizados nas etapas posteriores para calcular a similaridade.
- b. Recuperação de casos: a existência da instância *problema* é um condicionante dessa regra, em que os casos mais similares são escolhidos. Essa escolha pode ter um papel fundamental no desempenho do protótipo caso a base de casos seja muito grande. Aqui, a recuperação é feita através de um atributo da classe *Caso*, chamado aplicação, que contém o tipo de estabelecimento no qual a planta é aplicada (por exemplo, hospital, aeroporto, indústria têxtil etc). Assim, somente os casos que possuem a mesma aplicação do problema são recuperados. Caso a base seja pequena, arbitra-se um número mínimo de casos que possuem a mesma aplicação. Se esse número não for atingido, todos os casos da base são recuperados.
- c. Determinação do caso mais similar: os condicionantes dessa etapa são as instâncias *problema* e os casos recuperados. As similaridades entre esses casos e o problema são calculadas. Além da função de similaridade propriamente dita, funções adicionais para encontrar valores máximos e mínimos de atributos são requeridas. O caso que apresentar a maior similaridade é escolhido para gerar a solução.
- d. Adaptação da solução: nesse bloco de regras está contido o conhecimento genérico que o domínio requer. As informações recuperadas do caso mais similar que interessam são os componentes da planta, sendo que os demais parâmetros necessitam ser reespecificados para que o caso seja adaptado às necessidades do problema. Assim, se a solução do caso apresenta, p. ex., cinco motores de 500 kW cada, no problema o número de motores de 500 kW deve ser recalculado em função dos requisitos de energia elétrica. Note que o conhecimento associado a esse cálculo é exatamente o mesmo utilizado no protótipo SE. É muito freqüente que essa etapa necessite de intervenção humana, justamente pela necessidade de

conhecimento sobre o domínio. Segundo Watson (1997), esse é o “calcanhar de Aquiles” da técnica RBC.

- e. Apresentação e retenção da solução: finalmente, a solução é apresentada para o usuário. Se for julgada adequada por um especialista, é então armazenada na base de casos.

5.3.5. INTERFACE

A interface do protótipo RBC é a própria interface padrão do CLIPS. Os dados de entrada apresentados na Tabela 5.1 são informados através de questionamentos que o protótipo faz acerca dos requisitos de projeto (Figura 5.6). Uma vez que todos os dados forem informados, o ciclo RBC é executado e a solução é apresentada (Figura 5.7).

Tabela 5.1. Dados de entrada do protótipo.

Requisito	Descrição	
Aplicação	Qual tipo de cliente a planta deve atender: indústrias, hotéis, hospitais, serviços etc.	
Regime	Operação na base (24 h/dia, 7 dias/semana) ou na ponta (3 h/dia, 5 dias/semana)	
Energia elétrica	Demanda máxima (kW)	Máxima demanda observada no perfil de demanda
	Demanda mínima (kW)	Mínima demanda observada no perfil de demanda
	Energia consumida (kWh)	Integral do perfil de demanda ao longo do período considerado (Eq. 3.1a)
Vapor saturado	Pressão (bar)	Pressão requerida pela aplicação de vapor saturado (manométrica)
	Vazão (kg/s)	Vazão requerida; em geral é um dado desconhecido em instalações existentes, sendo 2,78 kg/s um valor típico
	Taxa de retorno de condensado	Expressa a quantidade de vapor consumida no processo, sendo 0,8 um valor típico
	Temperatura do condensado (°C)	Temperatura com o qual o condensado deixa o processo, normalmente por volta de 60 °C
Água gelada	Carga térmica (kW)	Carga térmica demandada pelo ambiente a ser condicionado

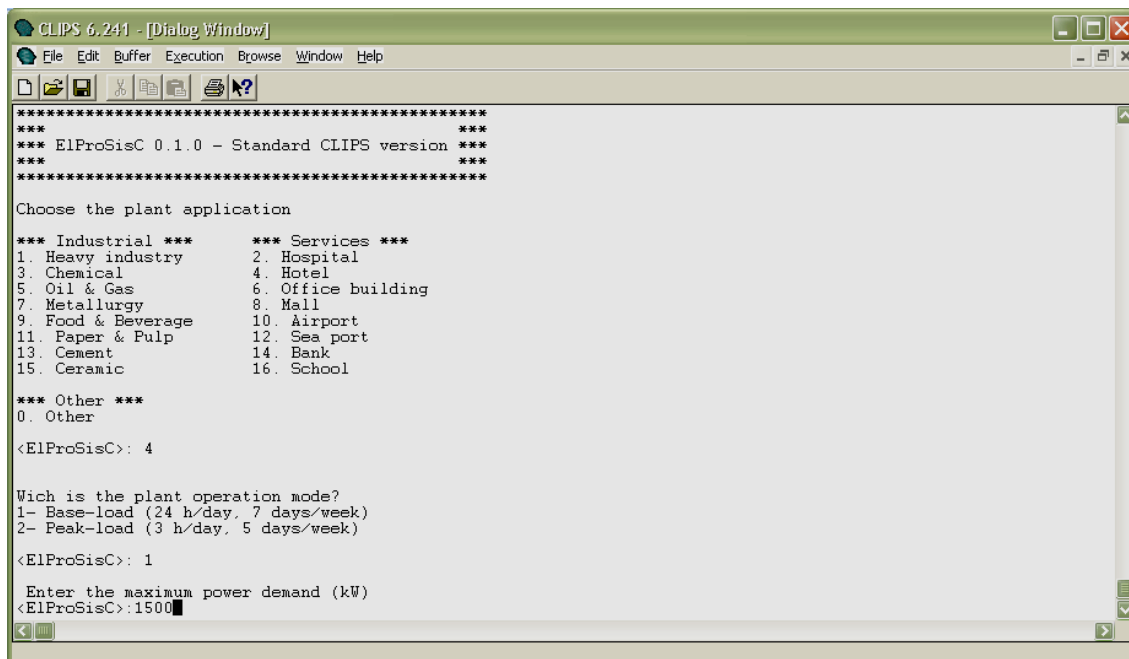


Figura 5.6. Protótipo RBC: entrada de dados.

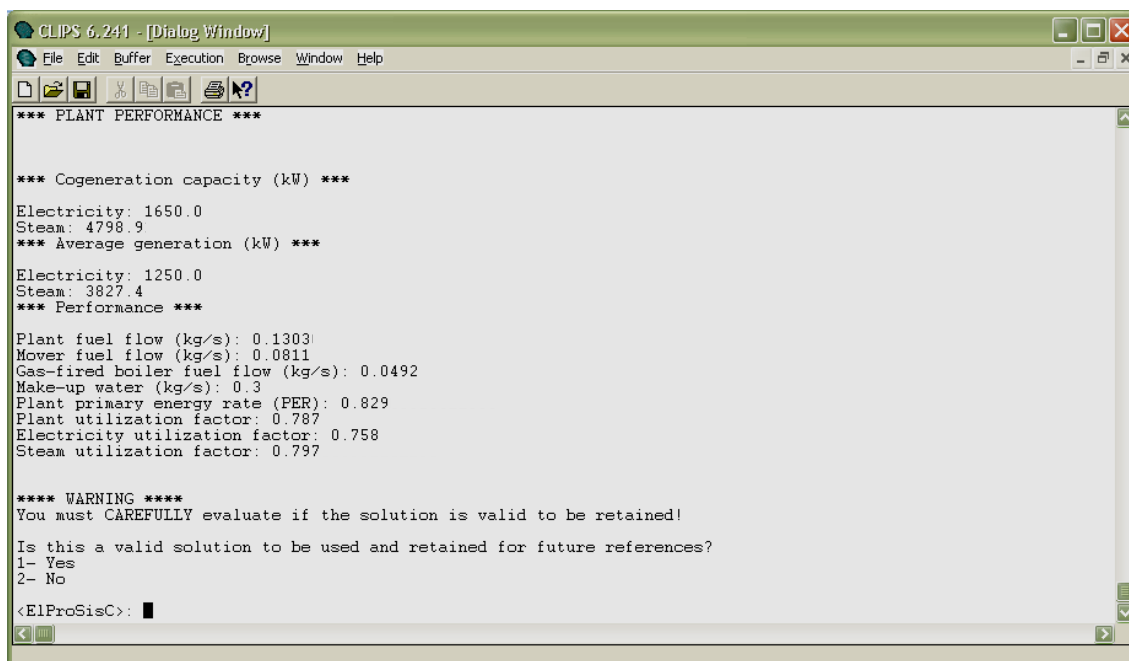


Figura 5.7. Protótipo RBC: dados de saída.

5.4. VALIDAÇÃO

Em RBC, o conceito de validação é diferente daquele apresentado em Sistemas Especialistas. Nesses últimos, o que se deseja validar é fundamentalmente a

consistência da base de conhecimento através da avaliação de algumas soluções, já que é virtualmente impossível examinar todas as possíveis soluções geradas por um SE. Já em RBC cada solução gerada a partir da recuperação de um caso deve ser validada e, caso seja satisfatória, ser retida na base de casos para uso futuro. Isso pode ser visto na Figura 5.7; ao se apresentar a solução, o protótipo RBC alerta que a solução apresentada deve ser cuidadosamente avaliada para torná-la válida e retê-la na base de casos.

5.5. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

O desenvolvimento de um protótipo RBC para projeto de plantas de cogeração foi apresentado nesse capítulo. Atenção especial foi dada aos conceitos fundamentais do Raciocínio Baseado em Casos, como representação de casos e medidas de similaridade. No próximo capítulo são apresentados e discutidos os resultados de problemas selecionados que foram executados nos protótipos SE e RBC.

6. ESTUDO DE PROBLEMAS E DISCUSSÃO

No presente capítulo, são apresentados e discutidos os resultados de problemas selecionados que foram executados nos protótipos SE e RBC. Os problemas envolvem todas as possíveis combinações de demandas energéticas. Isso gera um número de problemas que permite explorar ao máximo as características mais relevantes dos protótipos, especialmente a geração de soluções alternativas. A futura integração SE/RBC em um único protótipo é discutida com base nos casos estudados.

6.1. PROBLEMAS EXECUTADOS NO PROTÓTIPO SE

Nessa seção são apresentados quatro problemas estudados, cada um referente a uma diferente combinação de demandas energéticas requeridas.

6.1.1. PROBLEMA 1: ENERGIA ELÉTRICA

O primeiro problema estudado apresenta apenas demanda de energia elétrica, conforme a Tabela 6.1. O protótipo SE gerou duas soluções: as especificações dos componentes são mostradas na Tabela 6.2 e os parâmetros de desempenho, na Tabela 6.3. Os diagramas gerados para essas soluções são apresentados na Figura 6.1.

Tabela 6.1. Requisitos de projeto do Problema 1.

Demanda	Requisito	Valor
Energia elétrica	Regime	Base
	De,max (kW)	21000
	De,min (kW)	18000
	Ce (MWh)	487
Vapor saturado	Não requerido	--
Água gelada	Não requerida	--

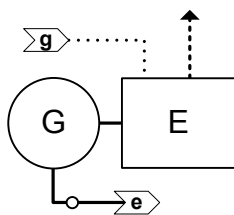
Tabela 6.2. Soluções geradas pelo protótipo SE para o Problema 1: componentes.

Item	Solução 1	Solução 2
Diagrama	Fig. 6.1a	Fig. 6.1b
Acionador	Motor	Turbina
Fabricante	Waukesha	European Gas Turb.
Modelo	V12-AT27GL	Tempest
\dot{W}_{ac} (kW)	2100	7711
η_{ac}	0,371	0,309
n_{ac}	11	3

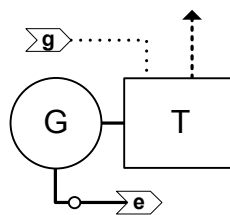
Tabela 6.3. Soluções geradas pelo protótipo SE para o Problema 1: desempenho.

Item	Solução 1	Solução 2
Capacidade de geração (kW)		
Energia elétrica	23100	23133
Potência média gerada (kW)		
Energia elétrica	20292	20292
Desempenho da planta		
$\dot{m}_{gn,pl}$ (kg/s) ¹	1,164	1,397
α	0,371	0,309
$\mu_{el} = \mu_{ac}$	0,878	0,877

1. considerando-se potência média gerada (PCI = 47000 kJ/kg).



(a) Solução 1



(b) Solução 2

Figura 6.1. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 1.

O protótipo SE explica essas soluções da seguinte forma:

Solução 1: O circuito acionador baseado em motor foi selecionado por ser adequado para aplicações de base ou de ponta. Essa última requer muitas partidas, sendo desejáveis as características de partida rápida e fácil presentes no motor. A eficiência em carga parcial do motor o faz adequado em aplicações com acentuadas variações de carga.

Solução 2: O circuito acionador baseado em turbina foi selecionado porque é adequado para aplicações de base, devido principalmente à sua alta confiabilidade e disponibilidade.

Dessas explicações, pode-se deduzir que se o regime de operação fosse ponta somente o motor seria selecionado, o que é coerente com o conhecimento de que turbinas não devem ser submetidas a sucessivas partidas. Deve-se ressaltar também que foram geradas duas soluções porque a base de dados dos acionadores contém motores e turbinas cujas capacidades são compatíveis com as demandas requeridas. Caso as demandas fossem relativamente pequenas (da ordem de 1900 kW), a menor das turbinas da base de dados

ficaria superdimensionada, inviabilizando a solução baseada em turbinas. Reciprocamente, se as demandas fossem relativamente grandes, o maior dos motores da base ficaria subdimensionado (mesmo considerando o número máximo permitido de motores: ver Eq. 3.5), o que inviabiliza essa solução.

6.1.2. PROBLEMA 2: ENERGIA ELÉTRICA E VAPOR

Neste problema os requisitos de projeto são energia elétrica e vapor saturado, apresentados na Tabela 6.4. O protótipo SE gerou três soluções: as especificações dos componentes são mostradas na Tabela 6.5 e os parâmetros de desempenho, na Tabela 6.6. Os diagramas gerados para essas soluções são apresentados na Figura 6.2. Por simplicidade, as caldeiras de reserva são omitidas na figura.

Tabela 6.4. Requisitos de projeto do Problema 2.

Demanda	Requisito	Valor
Energia elétrica	Regime	Base
	$D_{e,max}$ (kW)	21000
	$D_{e,min}$ (kW)	18000
	C_e (MWh)	487
Vapor saturado	P (bar)	8
	\dot{m}_v (kg/s)	2,78
	r	Desconhecida
	T_c (°C)	Desconhecida
Água gelada	Não requerida	--

Tabela 6.5. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 2: componentes.

Item	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Diagrama	Fig. 6.2a	Fig. 6.2b	Fig. 6.2c
Acionador	Turbina	Motor	Motor
Fabricante	European Gas Turb.	Waukesha	Waukesha
Modelo	Tempest	V12-AT27GL	V12-AT27GL
\dot{W}_{ac} (kW)	7711	2100	2100
η_{ac}	0,309	0,371	0,371
n_{ac}	3	11	11
Caldeira de recuperação			
P (bar)	8	8	8
\dot{Q}_{cr}^* (kW)	15914	1087	954
$\dot{m}_{v,cr}^*$ (kg/s)	6,24	0,426	0,424
$\dot{m}_{v,cr}$ (kg/s)	2,78	0,397	0,397
\dot{m}_g^* (kg/s)	31,5	4,216	4,216
\dot{m}_g (kg/s)	14,0	3,929	3,946
$T_{g,e}$ (°C)	551	350	350
$T_{g,s}$ (°C)	130,0	135,2	161,5
T_c (°C)	53	53	125
pp^* (°C)	30	5	5
ap^* (°C)	20	5	5
n_{cr}	1	7	7

Tabela 6.5. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Prob. 2: componentes (cont.).

Caldeira a gás			
Função	Reserva	Reserva	Reserva
\dot{Q}_{cg} (kW)	8343	8343	8343
$\dot{m}_{v,cg}^*$ (kg/s)	2,78	2,78	2,78
η_{cg}	0,85	0,85	0,85
n_{cg}	1	1	1
Trocador de calor água-água			
\dot{Q}_{tc} (kW)	--	--	128,2
\dot{m}_q (kg/s)	--	--	47,1
\dot{m}_f (kg/s)	--	--	0,424
$T_{q,c}$ (°C)	--	--	125
$T_{q,s}$ (°C)	--	--	124,4
$T_{f,e}$ (°C)	--	--	53
$T_{f,s}$ (°C)	--	--	125
n_{tc}	--	--	7

Tabela 6.6. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 2: desempenho.

Item	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Capacidade de cogeração (kW)			
Energia elétrica	23133	23100	23100
Vapor saturado	15914	7609	7575
Potência média gerada (kW)			
Energia elétrica	20292	20292	20292
Vapor saturado	7092	7092	7092
Desempenho da planta			
$\dot{m}_{gn,pl}$ (kg/s)	1,397	1,164	1,164
\dot{m}_{rep} (kg/s)	0,556	0,556	0,556
α	0,417	0,454	0,454
μ_{pl}	0,701	0,892	0,892
μ_{el}	0,877	0,878	0,878
μ_v	0,446	0,932	0,936

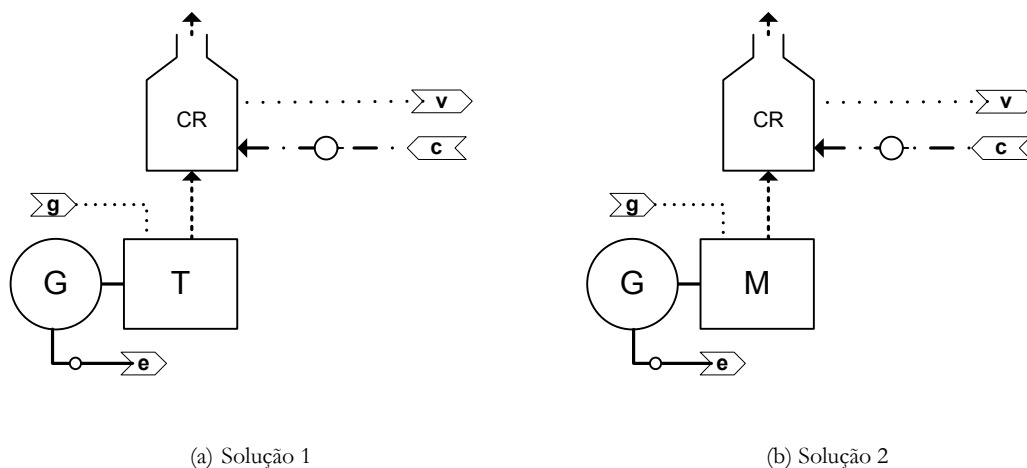
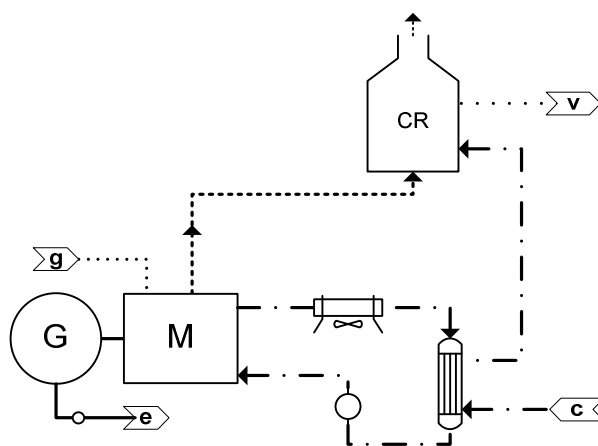


Figura 6.2. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 2.



(c) Solução 3

Figura 6.2. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 2 (cont.).

Como os requisitos de energia elétrica são os mesmos, as explicações a respeito da escolha dos circuitos acionadores são as mesmas do Problema 1. Com relação aos circuitos de vapor, as soluções são explicadas pelo protótipo SE da seguinte forma:

Soluções 1 e 2: *Esse circuito de geração de vapor foi selecionado porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar²⁷.*

Solução 3: *Esse circuito de geração de vapor foi selecionado porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar e porque a temperatura da água das camisas é suficiente para pré-aquecer o condensado.*

As explicações do protótipo SE sobre os dados desconhecidos de demanda de vapor são:

²⁷ Ver seção 3.2.

Se a taxa de retorno de condensado for desconhecida, considere que uma reposição de 20% é requerida na maioria dos sistemas de geração de vapor. Se a temperatura do condensado for desconhecida, considere 60 °C um valor típico.

Em todas as soluções, a capacidade das caldeiras de recuperação é maior que a demanda de vapor ($n_{cr}\dot{m}_{v,cr}^* \geq \dot{m}_v$), o que implica que as caldeiras a gás são usadas apenas como reserva.

6.1.3. PROBLEMA 3. ENERGIA ELÉTRICA E ÁGUA GELADA

Este problema é interessante por ser o que mais gera diferentes soluções. Os requisitos de projeto são energia elétrica e água gelada, apresentados na Tabela 6.7. O protótipo SE gerou cinco soluções: as especificações dos componentes são mostradas na Tabela 6.8 e os parâmetros de desempenho, na Tabela 6.9. Pode-se perceber que o dimensionamento das caldeiras de recuperação desse problema difere daquelas do problema 2, apesar da vazão e temperatura dos gases de exaustão serem as mesmas. A justificativa é que a temperatura do condensado é diferente, o que resulta em capacidades, *pinch point* e *approach point* diferentes. Os diagramas gerados para essas soluções são apresentados na Figura 6.3. As máquinas de refrigeração por compressão de reserva não são mostradas por simplicidade.

Tabela 6.7. Requisitos de projeto do Problema 3.

Demanda	Requisito	Valor
Energia elétrica	Regime	Base
	De,max (kW)	21000
	De,min (kW)	18000
	Ce (MWh)	487
Vapor saturado	Não requerido	--
Água gelada	\bar{D}_{ag} (kW)	1760

Tabela 6.8. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 3: componentes.

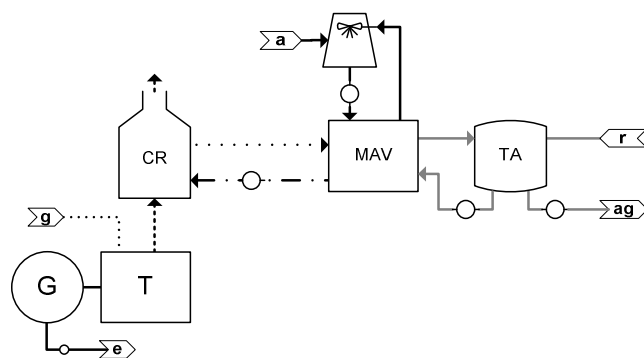
Item	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
Diagrama	Fig. 6.3a	Fig. 6.3b	Fig. 6.3c	Fig. 6.3d	Fig. 6.3e
Acionador	Turbina	Motor	Motor	Motor	Motor
Fabricante	European Gas Turb.	Waukesha	Waukesha	Waukesha	Waukesha
Modelo	Tempest	V12-AT27GL	V12-AT27GL	V12-AT27GL	V12-AT27GL
\dot{W}_{ac} (kW)	7711	2100	2100	2100	2100
η_{ac}	0,309	0,371	0,371	0,371	0,371
μ_{ac}	0,877	0,878	0,878	0,878	0,878
n_{ac}	3	11	11	11	11

Tabela 6.8. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Prob. 3: componentes (cont.).

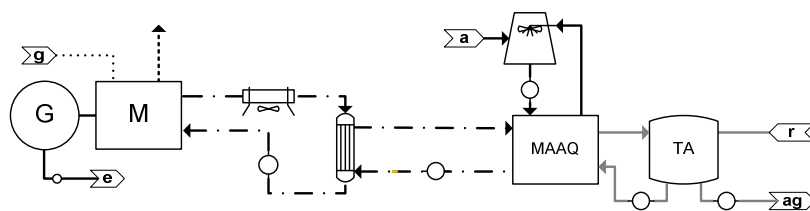
Máquina de refrigeração por absorção (vapor)					
Fabricante	LS Mtron	--	--	LS Mtron	LS Mtron
Modelo	LSH-G050	--	--	LSH-G050	LSH-G028
\dot{Q}_{mra} (kW)	1759	--	--	1759	985
COP_a	1,57	--	--	1,57	1,42
$\dot{m}_{v,mra}$ (kg/s)	0,55	--	--	0,55	0,342
n_{mra}	1	--	--	1	1
Caldeira de recuperação					
P (bar)	8	--	--	8	8
\dot{Q}_{cr}^* (kW)	13480	--	--	787	787
$\dot{m}_{v,cr}^*$ (kg/s)	6,24	--	--	0,387	0,387
$\dot{m}_{v,cr}$ (kg/s)	0,55	--	--	0,275	0,342
\dot{m}_g^* (kg/s)	31,5	--	--	4,216	4,216
\dot{m}_g (kg/s)	2,609	--	--	2,996	3,726
$T_{g,e}$ (°C)	551	--	--	350	350
$T_{g,s}$ (°C)	194,4	--	--	194,4	194,4
T_c (°C)	172,5	--	--	172,5	172,5
pp^* (°C)	22	--	--	22	22
n_{cr}	1	--	--	2	1
Máquina de refrigeração por absorção (água quente)					
Fabricante	--	LS Mtron	LS Mtron	--	LS Mtron
Modelo	--	E520VL	E520VL	--	C240AL
\dot{Q}_{mra} (kW)	--	1829	1829	--	844
COP_a	--	0,70	0,70	--	0,70
$\dot{m}_{aq,mra}$ (kg/s)	--	124,7	124,7	--	57,5
n_{mra}	--	1	1	--	1
Trocador de calor água-água					
\dot{Q}_{tc} (kW)	--	873	989	--	604
\dot{m}_q (kg/s)	--	47,1	47,1	--	47,1
\dot{m}_f (kg/s)	--	41,6	62,4	--	28,8
$T_{q,e}$ (°C)	--	125	125	--	125
$T_{q,s}$ (°C)	--	120,6	120	--	121,9
$T_{f,e}$ (°C)	--	83	83	--	83
$T_{f,s}$ (°C)	--	88	86,8	--	88
n_{tc}	--	3	2	--	2
Trocador de calor gás-água					
\dot{Q}_{tc} (kW)	--	--	320	--	--
\dot{m}_q (kg/s)	--	--	4,216	--	--
\dot{m}_f (kg/s)	--	--	62,4	--	--
$T_{q,e}$ (°C)	--	--	350	--	--
$T_{q,s}$ (°C)	--	--	286,7	--	--
$T_{f,e}$ (°C)	--	--	86,8	--	--
$T_{f,s}$ (°C)	--	--	88	--	--
n_{tc}	--	--	2	--	--
Máquina de refrigeração por compressão mecânica					
Função	Reserva	Reserva	Reserva	Reserva	Reserva
Fabricante	LS Mtron	LS Mtron	LS Mtron	LS Mtron	LS Mtron
Modelo	LTP050	LTP050	LTP050	LTP050	LTP050
\dot{Q}_{mrc} (kW)	1759	1759	1759	1759	1759
COP_c	5,04	5,04	5,04	5,04	5,04
\dot{W}_{mrc} (kW)	349	349	349	349	349
n_{mrc}	1	1	1	1	1

Tabela 6.9. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 3: desempenho.

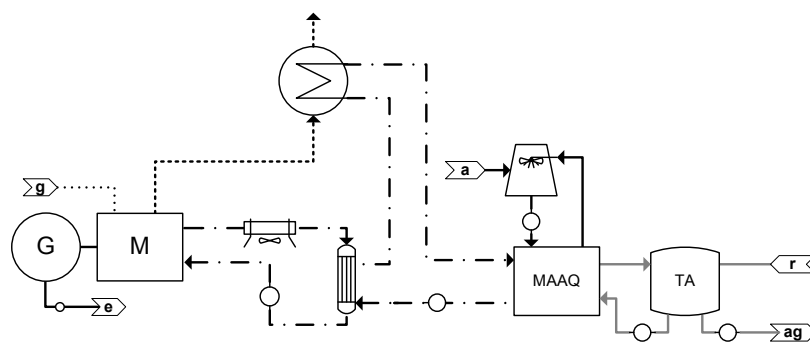
Item	Solução 1	Solução 2	Solução 3	Solução 4	Solução 5
Capacidade de cogeração (kW)					
Energia elétrica	23133	23100	23100	23100	23100
Água gelada	1759	1829	1829	1759	1829
Potência média gerada (kW)					
Energia elétrica	20292	20292	20292	20292	20292
Água gelada	1759	1759	1759	1759	1759
Desempenho da planta					
$\dot{m}_{gn,pl}$ (kg/s)	1,397	1,164	1,164	1,164	1,164
α	0,336	0,365	0,365	0,365	0,365
μ_{pl}	0,886	0,885	0,885	0,887	0,885
μ_{el}	0,877	0,878	0,878	0,878	0,878
μ_{ag}	1,0	0,962	0,962	1,0	0,962



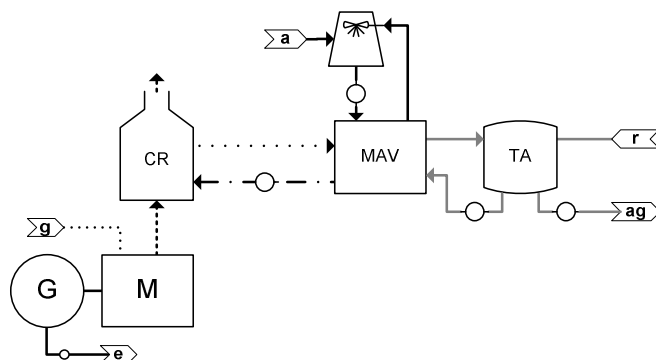
(a) Solução 1



(b) Solução 2

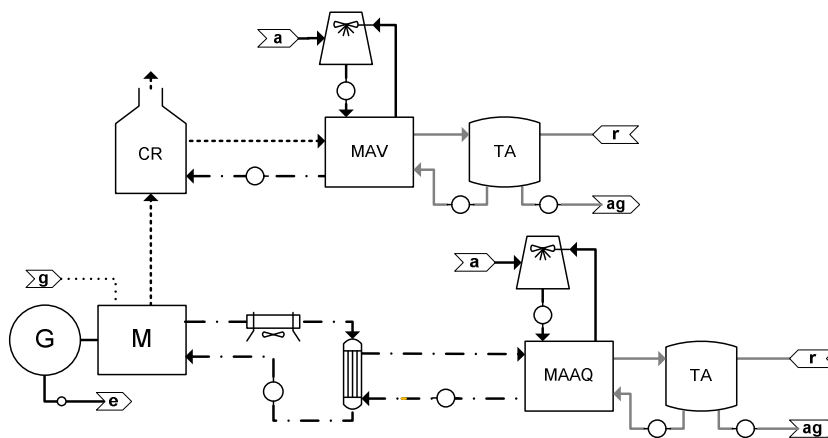


(c) Solução 3



(d) Solução 4

Figura 6.3. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 3.



(e) Solução 5

Figura 6.3. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Prob. 3 (cont.).

Como os requisitos de energia elétrica são os mesmos, as explicações a respeito da escolha dos circuitos acionadores são as mesmas do Problema 1. Com relação aos circuitos de recuperação de calor, as soluções são explicadas pelo protótipo SE da seguinte forma:

Soluções 1 e 4: *Esse circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada utilizando-se máquinas de refrigeração a vapor de alto coeficiente de performance. O circuito de geração de vapor foi selecionado para gerar vapor para esse circuito de água gelada porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar.*

Solução 2: *Esse circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada a partir do calor de baixa temperatura associado à água das camisas do motor. O circuito de água quente é selecionado para gerar a água quente necessária para as máquinas de absorção porque essa é uma boa oportunidade de se recuperar tanto o calor de baixa qualidade rejeitado pela água das camisas do motor como também o de alta qualidade rejeitado pelos gases de exaustão.*

Solução 3: *Esse circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada a partir do calor de baixa temperatura associado à água das camisas do motor. O circuito de água quente foi*

selecionado para gerar a água quente necessária para esse circuito de água gelada porque essa é uma boa oportunidade de se recuperar calor de baixa qualidade rejeitado pelo motor.

Solução 5: *Um dos circuitos de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada a partir do calor de baixa temperatura associado à água das camisas do motor. O circuito de água quente foi selecionado para gerar a água quente necessária para esse circuito de água gelada porque essa é uma boa oportunidade de se recuperar calor de baixa qualidade rejeitado pelo motor. Outro circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada utilizando-se máquinas de refrigeração a vapor de alto coeficiente de performance. O circuito de geração de vapor foi selecionado para gerar vapor para esse circuito de água gelada porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar.*

Note que a solução 5 é uma combinação das soluções 1 e 2, sendo natural que a explicação da solução 5 seja também uma combinação das explicações dessas soluções. Interessante notar também que o uso de máquinas por absorção de duplo estágio não implica, necessariamente, em maior taxa de energia primária. Em todas as soluções, a capacidade de termoacumulação das máquinas de absorção é maior que o consumo diário de água gelada ($n_{mra} \dot{Q}_{mra} \Delta t \geq C_{ag}$), tal que as máquinas de compressão mecânica são usadas apenas como reserva.

6.1.4. PROBLEMA 4. ENERGIA ELÉTRICA, VAPOR E ÁGUA GELADA

Embora não gere tantas soluções como o problema anterior, o problema 4 é interessante por ser o de maior complexidade, já que todas as demandas são exigidas. Os requisitos de projeto são energia elétrica, vapor e água gelada, apresentados na Tabela 6.10. O protótipo SE gerou duas soluções: as especificações dos componentes são mostradas na Tabela 6.11 e os parâmetros de desempenho, na Tabela 6.12. Os diagramas gerados para essas soluções são apresentados na Figura 6.4.

Tabela 6.10. Requisitos de projeto do Problema 4.

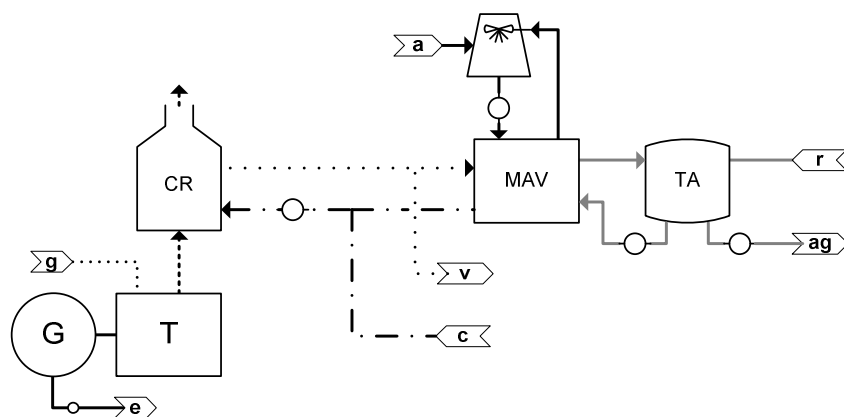
Demanda	Requisito	Valor
	Regime	Base
Energia elétrica	$D_{e,max}$ (kW)	21000
	$D_{e,min}$ (kW)	18000
	C_e (MWh)	487
Vapor saturado	P (bar)	8
	\dot{m}_v (kg/s)	2,78
	r	Desconhecida
	T_c (°C)	Desconhecida
Água gelada	\bar{D}_{ag} (kW)	1760

Tabela 6.11. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 4: componentes.

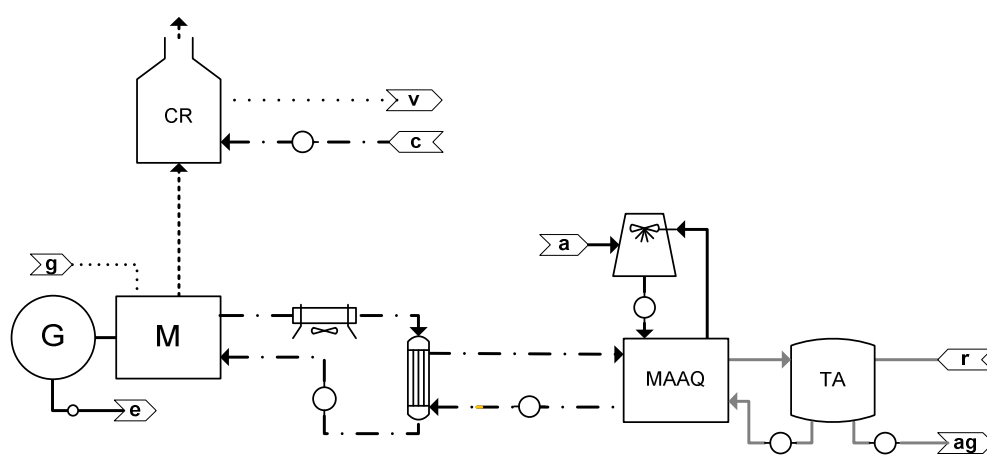
Item	Solução 1	Solução 2
Diagrama	Fig. 6.4a	Fig. 6.4b
Acionador	Turbina	Motor
Fabricante	European Gas Turb.	Waukesha
Modelo	Tempest	V12-AT27GL
\dot{W}_{ac} (kW)	7711	2100
η_{ac}	0,309	0,371
n_{ac}	3	11
Máquina de refrigeração por absorção (vapor)		
Fabricante	LS Mtron	--
Modelo	LSH-G050	--
\dot{Q}_{mra} (kW)	1759	--
COP_a	1,57	--
$\dot{m}_{v,mra}$ (kg/s)	0,55	--
n_{mra}	1	--
Caldeira de recuperação		
P (bar)	8	8
\dot{Q}_{cr}^* (kW)	15871	1087
$\dot{m}_{v,cr}^*$ (kg/s)	6,50	0,426
$\dot{m}_{v,cr}$ (kg/s)	3,33	0,397
\dot{m}_g (kg/s)	31,5	4,216
$T_{g,e}$ (°C)	551	350
$T_{g,s}$ (°C)	131,1	135,2
T_c (°C)	79,4	53
pp^* (°C)	15	5
ap^* (°C)	15	5
n_{cr}	1	7
Máquina de refrigeração por absorção (água quente)		
Fabricante	--	LS Mtron
Modelo	--	E520VL
\dot{Q}_{mra} (kW)	--	1829
COP_a	--	0,70
$\dot{m}_{aq,mra}$ (kg/s)	--	124,7
n_{mra}	--	1
Trocador de calor água-água		
\dot{Q}_{tc} (kW)	--	873
\dot{m}_q (kg/s)	--	47,1
\dot{m}_f (kg/s)	--	41,6
$T_{q,e}$ (°C)	--	125
$T_{q,s}$ (°C)	--	120,6
$T_{f,e}$ (°C)	--	83
$T_{f,s}$ (°C)	--	88
n_{te}	--	3
Caldeira a gás		
Função	Reserva	Reserva
\dot{Q}_{cg} (kW)	8343	8343
$\dot{m}_{v,cg}^*$ (kg/s)	2,78	2,78
η_{cg}	0,85	0,85
n_{cg}	1	1
Máquina de refrigeração por compressão mecânica		
Função	Reserva	Reserva
Fabricante/Modelo	LS Mtron/LTP050	LS Mtron/LTP050
\dot{Q}_{mrc} (kW)	1759	1759
COP_c	5,04	5,04
\dot{W}_{mrc} (kW)	349	349
n_{mrc}	1	1

Tabela 6.12. Soluções apresentadas pelo protótipo SE para o Problema 4: desempenho.

Item	Solução 1	Solução 2
Capacidade de cogeração (kW)		
Energia elétrica	23133	23100
Vapor	15871	7609
Água gelada	1759	1829
Potência média gerada (kW)		
Energia elétrica	20292	20292
Vapor	7092	7092
Água gelada	1759	1759
Desempenho da planta		
$\dot{m}_{gn,pl}$ (kg/s) ¹	1,397	1,164
\dot{m}_{rep} (kg/s)	0,556	0,556
α	0,444	0,483
μ_{pl}	0,715	0,896
μ_{cl}	0,968	0,969
μ_v	0,447	0,932
μ_{ag}	1,0	0,962



(a) Solução 1



(b) Solução 2

Figura 6.4. Diagramas gerados pelo protótipo SE para o Problema 4.

Como os requisitos de energia elétrica são os mesmos, as explicações a respeito da escolha dos circuitos acionadores são as mesmas do Problema 1. Com relação aos circuitos de recuperação de calor, as soluções são explicadas pelo protótipo SE da seguinte forma:

Solução 1: *Esse circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada utilizando-se máquinas de refrigeração a vapor de alto coeficiente de performance. O circuito de geração de vapor foi selecionado para gerar vapor para esse circuito de água gelada e para atender a demanda de vapor de processo porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar.*

Solução 2: *Esse circuito de água gelada foi selecionado porque é possível gerar água gelada a partir do calor de baixa temperatura associado à água das camisas do motor. O circuito de água quente é selecionado para gerar a água quente necessária para as máquinas de absorção porque essa é uma boa oportunidade de se recuperar calor de baixa qualidade rejeitado pelo motor. Esse circuito de geração de vapor foi selecionado porque a temperatura dos gases de exaustão é alta o suficiente para gerar vapor saturado a até 20 bar.*

Note que a solução 2 desse problema é uma combinação da solução 2 do problema 2 com a solução 2 do problema 3. Logo, a explicação também é uma combinação das explicações dessas soluções. As explicações a respeito dos requisitos desconhecidos são as mesmas do problema 2. Em ambas as soluções, a capacidade das caldeiras de recuperação é maior que a demanda de vapor ($n_{cr}\dot{m}_{v,cr}^* \geq \dot{m}_v$) e a capacidade de termoacumulação das máquinas de absorção é maior que o consumo diário de água gelada ($n_{mra}\dot{Q}_{mra}\Delta t \geq C_{ag}$). Portanto, as caldeiras a gás e as máquinas de compressão mecânica são usadas apenas como reserva. Em caso de parada dos acionadores, a caldeira a gás não é utilizada para gerar vapor para a máquina de refrigeração por absorção, mas para o processo. A reserva de água gelada é garantida pela máquina de refrigeração por compressão mecânica.

6.2. PROBLEMA EXECUTADO NO PROTÓTIPO RBC

Nessa seção é apresentado um problema executado no protótipo RBC. A base do protótipo contém 18 casos, todos gerados pelo protótipo SE. Como a base do protótipo RBC contém os casos estudados na seção anterior, os requisitos de projeto do caso aqui estudado diferem daqueles executados no protótipo SE porque, de outro modo, o protótipo RBC geraria exatamente as mesmas soluções propostas pelo protótipo SE. Tal situação não expõe, de modo algum, uma limitação: ao contrário, é uma clara demonstração da coerência das duas abordagens. No entanto, para evidenciar as diferenças entre as abordagens e discutir suas vantagens e limitações, é mais interessante executar um novo caso tanto no protótipo RBC como no protótipo SE.

Neste quinto problema, os requisitos de projeto são energia elétrica e vapor saturado, apresentados na Tabela 6.13. O cálculo da similaridade entre o problema e os dois casos recuperados da base é mostrado na Tabela 6.14. Como os requisitos de ambos os casos são idênticos, as similaridades locais e globais são também idênticas. A diferença entre os dois casos está no conceito de suas soluções: em um deles é utilizado trocadores de calor para pré-aquecer o condensado; em outro, não²⁸. A partir dos casos recuperados, o protótipo RBC adapta os casos e gera duas soluções, que serão incorporadas à base de casos somente se forem validadas. As especificações dos componentes são mostradas na Tabela 6.15 e os parâmetros de desempenho, na Tabela 6.16. Para fins de comparação, as soluções geradas pelo protótipo SE para os mesmos requisitos são apresentadas nessas tabelas também. Os diagramas gerados para essas soluções são idênticos aos apresentados na Figura 6.2.

²⁸ Esses casos foram gerados pelo protótipo SE, que gerou dois conceitos diferentes para um mesmo conjunto de requisitos de projeto.

Tabela 6.13. Requisitos de projeto do Problema 5.

Demanda	Requisito	Valor
Energia elétrica	Regime	Base
	$D_{e,max}$ (kW)	4000
	$D_{e,min}$ (kW)	2500
	C_e (MWh)	86
	P (bar)	8
Vapor saturado	\dot{m}_v (kg/s)	0,7
	r	Desconhecida
	T_c (°C)	80
Água gelada	Não requerida	--

Tabela 6.14. Similaridade entre o problema e os casos recuperados.

Atributos		Valores		Similaridade
Item	Peso	Problema	(Casos 13 e 14)	(Casos 13 e 14)
Regime	3	Base	Base	1
$D_{e,max}$ (kW)	3	4000	1500	0,9485
$D_{e,min}$ (kW)	2	2500	800	0,9577
C_e (MWh)	2	86	30	0,9989
P (bar)	2	8	9	0,9
\dot{m}_v (kg/s)	2	0,7	2	0,9814
r	1	desconhecida	desconhecida	1
T_c (°C)	1	80	desconhecida	0
\bar{D}_{ag} (kW)	3	não requerida	não requerida	1
Similaridade global				0,9223

Tabela 6.15. Soluções dadas pelos protótipos RBC e SE para o Problema 5: componentes.

Item	Protótipo RBC		Protótipo SE		
	Solução 1	Solução 2	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Diagrama	Fig. 6.2b	Fig. 6.2c	Fig. 6.2a	Fig. 6.2b	Fig. 6.2c
Acionador	Motor	Motor	Turbina	Motor	Motor
Fabricante	Waukesha	Waukesha	Eur. Gas Turb.	Waukesha	Waukesha
Modelo	3600GL	3600GL	Typhoon 4.36	7100GL	7100GL
\dot{W}_{ac} (kW)	550	550	4344	1100	1100
η_{ac}	0,328	0,328	0,301	0,330	0,330
n_{ac}	8	8	1	4	4
Caldeira de recuperação					
P (bar)	8	8	8	8	8
\dot{Q}_{cr}^* (kW)	348	324	9252	731	673
$\dot{m}_{v,cr}^*$ (kg/s)	0,144	0,145	3,73	0,294	0,301
$\dot{m}_{v,cr}$ (kg/s)	0,140	0,140	0,7	0,233	0,233
\dot{m}_g (kg/s)	1,087	1,087	18,6	2,091	2,091
$T_{gs,e}$ (°C)	404	404	545	422	422
T_{gs} (°C)	130,6	155,8	130,5	130,5	153,9
T_c (°C)	69	125	69	69	125
pp^* (°C)	6	5	20	8	5
ap^* (°C)	6	5	20	8	5
n_{cr}	5	5	1	3	3
Caldeira a gás					
Função	reserva	reserva	reserva	reserva	reserva
\dot{Q}_{cg}^* (kW)	1739	1739	1739	1739	1739
$\dot{m}_{v,cg}^*$ (kg/s)	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
η_{cg}	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
n_{cg}	1	1	1	1	1
Trocador água-água					
\dot{Q}_{tc} (kW)	--	33	--	--	55
\dot{m}_q (kg/s)	--	18,8	--	--	37,6
\dot{m}_f (kg/s)	--	0,14	--	--	0,233
T_{qe} (°C)	--	125	--	--	125
T_{qs} (°C)	--	124,6	--	--	124,7
T_{fe} (°C)	--	69	--	--	69
T_{fs} (°C)	--	125	--	--	125
n_{tc}	--	5	--	--	3

Tabela 6.16. Soluções dos protótipos RBC e SE para o Problema 5: desempenho.

Item	Protótipo RBC		Protótipo SE		
	Solução 1	Solução 2	Solução 1	Solução 2	Solução 3
Capacidade de cogeração (kW)					
Energia elétrica	4400	4400	4344	4400	4400
Vapor saturado	3478	3307	9252	2193	2184
Potência média gerada (kW)					
Energia elétrica	3583	3583	3583	3583	3583
Vapor saturado	1739	1739	1739	1739	1739
Desempenho da planta					
$\dot{m}_{gn,pl}$ (kg/s)	0,2324	0,2324	0,2532	0,2310	0,2310
\dot{m}_{rep} (kg/s)	0,14	0,14	0,14	0,14	0,14
α	0,487	0,487	0,447	0,490	0,490
μ_{pl}	0,675	0,691	0,391	0,807	0,808
μ_{el}	0,814	0,814	0,825	0,814	0,814
μ_v	0,500	0,526	0,188	0,793	0,796

Do conjunto de atributos relativos à parte da solução dos casos recuperados, o protótipo RBC reutilizou os atributos associados ao acionador. Todos os demais atributos da solução foram adaptados, incluindo o número de acionadores. É interessante comparar as soluções geradas pelos protótipos RBC e SE mostradas nas Tabelas 6.15 e 6.16. A diferença mais evidente é que o protótipo SE gerou uma solução a mais, baseada em turbina. O protótipo RBC não foi capaz de gerar essa solução porque não havia em sua base um caso similar o suficiente cuja solução fosse baseada em turbina.

Notável também como as soluções baseadas em motores apresentam modelos de acionador diferentes. Enquanto o protótipo RBC propõe o uso de oito motores 3600GL (550 kW), o protótipo SE sugere quatro motores 7200GL (1100 kW). Isso se deve à função de otimização que o protótipo SE possui, garantindo que o acionador escolhido seja o que tenha o maior fator de utilização. No caso estudado em particular, é apenas coincidência que os acionadores sugeridos pelo protótipo RBC apresentem o mesmo fator de utilização dos escolhidos pelo protótipo SE. De fato, entre acionadores que possuem o mesmo fator de utilização, a função de otimização do protótipo SE tem como critério de desempate a eficiência e o número de acionadores. Isso justifica a escolha do SE pelo modelo 7200GL, mais eficiente que o 3600GL ($0,330 > 0,328$). O protótipo RBC, por sua vez, recupera a

informação de um acionador otimizado no contexto do caso recuperado, o que não garante que esse acionador seja ótimo no contexto do problema atual. O mesmo vale para as explicações: em princípio, o protótipo RBC poderia recuperar explicações no contexto do caso recuperado, mas elas poderiam não ser válidas no contexto atual. Assim, optou-se por não implementar essa função no protótipo RBC aqui apresentado.

A diferença entre os modelos de acionadores faz com que haja diferenças nos componentes que recuperam calor, já que os atributos de rejeição de calor dos modelos são diferentes. Para a mesma demanda de vapor, o protótipo RBC sugere cinco caldeiras de recuperação (348 kW sem pré-aquecimento, e 324 kW com), enquanto que o protótipo SE sugere três (731 kW sem pré-aquecimento, e 673 kW com).

É importante enfatizar que o sucesso do protótipo RBC em gerar soluções tecnicamente viáveis depende da base de casos: quanto mais casos houver na base, maiores as chances de se gerar soluções. Pelo fato da base considerada no presente trabalho ser relativamente pequena, pode acontecer de haver poucos casos (ou mesmo nenhum) que tenham a mesma aplicação²⁹ do problema, que é o atributo utilizado como critério de recuperação dos casos. Quando isso ocorre, todos os casos da base são recuperados para cálculo da similaridade. Ainda assim, há o risco do caso mais similar apresentar baixa similaridade global, o que pode resultar em soluções potencialmente inconsistentes. Para os propósitos do trabalho, o tamanho da base de casos não é um problema, já que o que se deseja é explorar as possibilidades da técnica RBC em projetos de plantas de cogeração. Por outro lado, esse é um ponto de fundamental importância ao se considerar o uso do protótipo em aplicações reais.

²⁹ Ver Capítulo 5: Tabela 5.1 e Figura 5.6.

6.3. INTEGRAÇÃO DOS PROTÓTIPOS SE E RBC

Um futuro desdobramento deste trabalho que merece destaque é a combinação das técnicas SE e RBC em um único protótipo. As diferentes características das técnicas contribuem para formar um sistema computacional inteligente sinérgico em que as limitações de uma técnica são compensadas pelos benefícios da outra. Por exemplo, sistemas especialistas não são capazes de auto-aprendizado, ao contrário do raciocínio baseado em casos; logo, a combinação de ambos resulta em um sistema capaz de auto-aprendizado. A sinergia entre as técnicas é mostrada na Tabela 6.17, onde os itens destacados se referem aos aspectos positivos de cada técnica. Os termos *difícil* e *fácil* encontrados nessa tabela têm caráter relativo. Por exemplo, representar conhecimento através de casos não é tão fácil ao ponto de ser trivial, mas é mais fácil que fazê-lo através de regras. *Razoável* é um termo intermediário entre *difícil* e *fácil*. Já os termos *rara* e *frequente* têm caráter absoluto: assim, na maioria das vezes, um sistema RBC necessita de intervenção humana (Watson, 1997), ao contrário de um sistema especialista. Um aspecto dessa integração explorado no presente trabalho foi o uso do protótipo SE para gerar a base de casos do protótipo RBC, especialmente quando a tentativa de se solucionar o problema via RBC resultava em casos recuperados com baixos valores de similaridade global.

Tabela 6.17. Sinergia entre as técnicas SE e RBC

Característica	SE	RBC	SE/RBC
Capacidade de auto-aprendizado	não	sim	sim
Inferência a partir de situações novas	sim	não	sim
Representação do conhecimento	difícil	fácil	razoável
Ampliação da base de conhecimento	difícil	fácil	razoável
Necessidade de se adaptar soluções	rara	frequente	rara
Necessidade de intervenção humana	rara	frequente	rara

A integração SE/RBC pode ser vista também como um modelo cognitivo mais completo das habilidades de um projetista do que os modelos isolados nos quais se baseiam as técnicas SE e RBC. De fato, um projetista humano é tanto capaz de inferir

novas soluções a partir de situações inéditas (característica marcante do SE³⁰) como se lembrar de soluções anteriores para solucionar problemas similares (típico do RBC). A limitação do sistema SE/RBC como modelo cognitivo é que o aprendizado humano não se limita à retenção de novos casos. O projetista também aprende novas heurísticas conforme se torna mais experiente, e esse aprendizado amplia sua capacidade de trabalhar com novos problemas. É exatamente esse aspecto que justifica a dificuldade de manter e ampliar a base de conhecimento de um SE, pois a incorporação de um novo conjunto de regras que representem as heurísticas aprendidas deve ser feita de modo a garantir a coerência de todo o processo de inferência. Além do mais, há a necessidade de validação da base, o que exigiria regras que manipulassem meta-conhecimento, ou seja, conhecimento sobre o conhecimento do domínio. Isso explica também porque nos itens 2 e 3 da Tabela 6.17 foram classificados como razoável na integração SE/RBC, pois a dificuldade de ampliação da base e de representação de conhecimento depende do que se deseja incrementar: regras (difícil) ou casos (fácil). Apesar da relativa facilidade de se incrementar uma base de casos, há também a necessidade de validar um caso antes de incorporá-lo à base.

Do ponto de vista de implementação computacional e considerando-se o domínio de projeto de plantas de cogeração, o aspecto mais atraente é a possibilidade – demonstrada no presente trabalho – de se utilizar o CLIPS para desenvolvimento do futuro protótipo SE/RBC. No protótipo RBC, em particular, a exploração da capacidade de manipulação de regras do CLIPS minimizou uma das principais limitações do RBC, que é a necessidade de intervenção humana na fase de adaptação de soluções³¹. As potencialidades que o CLIPS possui para programação orientada a objetos também contribuíram para uma

³⁰Muitos autores sustentam que um SE nunca pode gerar soluções realmente novas. Como o SE parte de um modelo de domínio de conhecimento fundamentado na teoria, no qual as soluções são tipicamente muito modulares, o que de fato o SE faz é combinar tais soluções de maneira não considerada antes, dando a impressão de criatividade.

³¹ Ver seção 5.3.4.

adequada representação e manipulação dos atributos dos casos, outro aspecto fundamental no sucesso do RBC em encontrar soluções viáveis.

6.4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE O CAPÍTULO

Nesse capítulo foram apresentados e discutidos os resultados de problemas executados nos protótipos SE e RBC, fomentando a discussão sobre a futura integração SE/RBC em um único protótipo. O próximo capítulo encerra o trabalho, mostrando as contribuições, conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

No presente trabalho foram desenvolvidos dois protótipos de sistemas computacionais inteligentes, baseados nas técnicas SE e RBC, respectivamente. Alguns estudos de casos foram conduzidos, mostrando o uso dos protótipos para apoio às fases de projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração, considerando cargas de energia elétrica, vapor saturado e água gelada como requisitos de projeto. As contribuições e conclusões do trabalho, bem como as sugestões para trabalhos futuros são mostradas a seguir.

7.1. CONTRIBUIÇÕES

No domínio de projeto de plantas de cogeração, ambos os protótipos SE e RBC apresentam características que não são encontradas em nenhum sistema computacional para esse domínio disponível até o momento, destacando-se:

- Geração de mais de uma solução para um mesmo conjunto de requisitos de projeto;
- No caso do protótipo SE, a habilidade de explicar e descrever as diferentes soluções;
- No caso do protótipo RBC, a habilidade de aprender a partir de sua própria experiência, ou seja, reter soluções em uma base de casos para futura referência;

O próprio uso da técnica RBC e sua implementação em CLIPS é inédito no domínio de projeto de plantas de cogeração, o que abre a possibilidade de se desenvolver um protótipo que combine SE e RBC em um mesmo ambiente de programação.

7.2. CONCLUSÕES

- O projeto conceitual e preliminar de plantas de cogeração a gás natural se mostrou um domínio adequado para a utilização das técnicas SE e RBC;
- A fase de projeto conceitual, na qual a geração de diferentes soluções conceituais exige conhecimento especializado e altamente heurístico, é particularmente adequada para a técnica SE;
- A fase de projeto preliminar é caracterizada ou pela especificação dos componentes com base em dados reais de equipamentos quando esses são disponíveis comercialmente (acionadores e máquinas de refrigeração) ou pelo seu dimensionamento, caso sejam equipamentos feitos sob encomenda (caldeiras e trocadores de calor);
- A habilidade que o protótipo SE tem de explicar as soluções lhe confere um caráter inteligente que não se vê em métodos de busca convencionais nem em técnicas de IA associadas à computação evolutiva (p. ex., algoritmos genéticos) ou ao conexionismo (p. ex., redes neurais);
- O desenvolvimento da base de conhecimento do protótipo SE foi mais trabalhoso que a do protótipo RBC, mesmo considerando a implementação de conhecimento associado à adaptação de soluções deste último;
- O sucesso do protótipo RBC em gerar soluções tecnicamente viáveis depende fortemente da base de casos: quanto mais casos houver na base, maiores as chances de se gerar soluções;
- Para um dado conjunto de requisitos de projeto, os resultados obtidos pelo protótipo RBC são idênticos aos obtidos pelo protótipo SE caso as soluções geradas pelo último, para o mesmo conjunto de requisitos, sejam incorporadas à base de casos do primeiro;

- No caso das soluções do protótipo SE não terem sido incorporadas à base do protótipo RBC, as soluções geradas pelo último são similares às aquelas geradas pelo primeiro para um mesmo conjunto de requisitos, sendo que a similaridade é medida pela função de similaridade global;
- A implementação do protótipo RBC no CLIPS foi bem sucedida e certamente facilitará o desenvolvimento de um protótipo que combine as técnicas SE e RBC;
- A integração SE/RBC pode ser vista como um modelo cognitivo mais completo das habilidades de um projetista do que os modelos isolados nos quais se baseiam as técnicas SE e RBC.

7.3. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Implementar a função de explicação no protótipo RBC;
- Implementar no CLIPS um protótipo que integre as técnicas SE e RBC;
- Ampliar a base de conhecimento para englobar outras tecnologias, como células-combustível e máquinas de refrigeração por absorção que utilizem diretamente os gases de exaustão;
- Ampliar o escopo para outros combustíveis, fazendo com que o protótipo gere soluções baseadas no ciclo de Rankine e no ciclo combinado;
- Considerar a especificação e dimensionamento de componentes periféricos, como torres de resfriamento e bombas;
- Considerar dados reais de operação em carga parcial de acionadores e máquinas de refrigeração, de modo a se obter parâmetros de desempenho da planta mais confiáveis;
- Implementar funções de análise de viabilidade econômica, tais como cálculo de taxa interna de retorno, valor presente líquido e tempo de retorno de investimento;

- Considerar métodos baseados na Segunda Lei da Termodinâmica, tais como análise exergoeconômica (Tsatsaronis e Pisa, 1994) ou a teoria do custo exergético (Lozano e Valero, 1993).

REFERÊNCIAS

1. Aamodt, A. e Plaza, E. (1994) Case-based reasoning: foundational issues, methodological variations, and system approaches. *AI Communications*, IOS Press. Vol. 7. Nº 1. pp 39-59.
2. Akagi, S.; Fujita, K. e Kubonish, H. (1988) Building an expert system for marine power plant design. In: *Proceedings of the 1988 ASME design automation conferences*. pp 297-302.
3. Almeida, F. J. (2000) Estudo e escolha de metodologia para o projeto conceitual. *Revista de Ciência e Tecnologia*. Vol. 8. No 16. pp 31-42.
4. Avramenko, Y. e Kraslawski, A. (2006) Similarity concept for case-based design in process engineering. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 30. No 3. pp 548-557.
5. Avramenko, Y., Nyström, L. e Kraslawski, A. (2004) Selection of internals for reactive distillation column – case-based reasoning approach. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 28. No 1-2. pp 37-44.
6. Balestieri, J.A.P. e Correia, P. B. (1997). Multi-objective linear model for pré-feasibility design of cogeneration systems. *Energy*. Vol. 22. No 5. pp 537-548.
7. Bazzo, E. (1995). *Geração de vapor*. Florianópolis: Editora da UFSC.
8. Bittencourt, G. (2001) *Inteligência artificial: ferramentas e teorias*. Florianópolis: Editora da UFSC.
9. Borba, R. A. P. (2002) *Avaliação térmica e econômica de sistemas de cogeração aplicados à indústria de cerâmica de revestimento*. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.

10. Brasil (2007). Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional 2007: Ano base 2006. Relatório final. Rio de Janeiro: EPE.
11. Castelani, M. R. (2003) Sistema especialista para o apoio operacional e diagnóstico em redes de distribuição de gás natural. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
12. Çengel, Y.A. e Boles, M. A. (2002) Thermodynamics: an Engineering Approach. New York: McGraw-Hill.
13. CLIPS (2006) A tool for building expert systems. Disponível em: <<http://clipsrules.sourceforge.net/>>. Acesso 23 janeiro 2008
14. Douglas, J. M. (1988) Conceptual design of chemical process. New York: McGraw-Hill.
15. Dym, C. L. e Levitt, R. E. (1991) Knowledge -Based Systems in Engineering. New York: McGraw-Hill.
16. EDUCOGEN – An Educational Tool for Cogeneration (2001). The European Association for the Promotion of Cogeneration. Disponível em: <www.cogen.org/projects/educogen.htm>. Acesso: 12 maio 2005.
17. Finnie, G. e Sun, Z. (2003) R⁵ model for case-based reasoning. Knowledge-Based Systems. Vol. 16. No 1. pp 59-65.
18. Fujita, K.; Akagi, S.; Yoshida, K. e Hirokawa, N. (1996) Genetic algorithm based optimal planning method of energy plant configurations. In: Proceedings of the 1996 ASME design engineering: technical conferences. pp 1-12.
19. Gentner, D. (1983). Structure mapping - a theoretical framework for analogy. Cognitive Science. Vol 7. pp.155-70.
20. Giarratano, J. C. e Riley, G. (1994) Expert systems: principles and programming. Boston: PWS.

21. Gonzalez, A. J. e Dankel, D. D. (1993) The engineering of knowledge-based systems: theory and practice. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
22. Greenberg, H. J. Mathematical programming glossary. Disponível em: <<http://www.cudenver.edu/~hgreenbe/glossary/>>. Acesso 10 março 2005.
23. Havelský, V. (1999) Energetic efficiency of cogeneration systems for combined heat, cold and power production. International Journal of Refrigeration. Vol.22. No 6. pp 479-485.
24. Heitkötter, J. e Beasley, D. (2000) The hitch-hiker's guide to evolutionary computation. Issue 8.1. Disponível em: <<http://www.cse.dmu.ac.uk/~rij/gafaq/top.htm>>. Acesso 12 novembro 2007.
25. Hernandez, C. e Arjona, M. A. (2008) An intelligent assistant for designing distribution transformers. Expert Systems with Applications. Vol.34. No 3. pp 1931-1937.
26. Hostrup, M., Gani, R., Kravanja, Z., Sorsak, A. e Grossman, I. (2001). Integration of thermodynamic insights and MINLP optimization for the synthesis, design and analysis of process flowsheets. Computers e Chemical Engineering. Vol. 25. No 1. pp 73-83.
27. Itaipu Binacional (2008). Disponível em <<http://www.itaipu.gov.br>>. Acesso 19 maio 2008.
28. Kingston, J. (2004) Conducting feasibility studies for knowledge based systems. Knowledge-Based Systems. Vol. 17. No 2-4. pp 157-164.
29. Klein, S. (1992) An example of knowledge-based decision making when selecting standard components: shaft-hub connections. Proceedings of the 3th International Conference on Design Theory and Methodology. New York. ASME. pp. 149-156.
30. Kong, X.Q., Wang, R.Z., Wu, J.Y., Huang, X.H., Huangfu, Y., Wu, D.W. e Xu, Y.X. (2005) Experimental Investigation of a Micro-combined Cooling, Heating and

- Power System Driven by a Gas Engine. *International Journal of Refrigeration*. Vol 28. No 7. pp 977-987.
31. Kott, A. S., May, J. H. e Hwang, C. C. (1989a) An autonomous artificial designer of thermal energy systems: Part 1 – Theoretical considerations. *Transactions of ASME: Journal of Gas Turbine and Power*. Vol. 111. No 4. pp 728-733.
32. Kott, A. S., May, J. H. e Hwang, C. C. (1989b) An autonomous artificial designer of thermal energy systems: Part 2 – Solution algorithm.. *Transactions of ASME: Journal of Gas Turbine and Power*. Vol. 111. No 4. pp 734-739.
33. Kraslawski, A., Koironen, T. e Nyström, L. (1995) Case-based reasoning system for mixing equipment selection. *Computers and Chemical Engineering*. Vol. 19. No 1. pp 821-826.
34. Leonardo da Vinci, 1452-1519. *Il Codice Atlantico della Biblioteca Ambrosiana di Milano*. Foglio 21-recto. Disponível em http://www.ambrosiana.it/ita/ca_sfoglia.asp?sala=&pagina=22>. Acesso em: 25 julho 2006.
35. López-Arévalo, I, Bañares-Alcántara, R., Aldea, A., Rodríguez-Martínez, A. e Jiménez, L. (2007) Generation of process alternatives using abstract models and case-based reasoning. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 31. No 8. pp 902-918.
36. Lozano, M. A. e Valero, A. (1993). Theory of exergetic cost. *Energy*. Vol. 18. No 9. pp. 939-960.
37. Mandow, L. e Pérez-de-la-Cruz, J. (2004) Sindi: an intelligent assistant for highway design. *Expert Systems with Applications*. Vol. 27. No 4. pp 635-644.
38. Manninen, J. e Zhu, X. X. (2001). Level-by-level Flowsheet Synthesis Methodology for Thermal System Design. *AiChE Journal*. Vol. 47. No 1. pp 142-159.

39. Matelli, J. A. (2001) Sistemas de cogeração baseados em células-combustível aplicados em hospitais. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
40. Matelli, J. A. e Bazzo, E. (2005) A methodology for thermodynamic simulation of high temperature, internal reforming fuel cell systems. *Journal of Power Sources*. Vol. 142. No 1-2. pp 160-168.
41. Matelli, J.A., Bazzo, E. e Silva, J.C. (2007) A combined expert system/case-based reasoning approach for cogeneration plant design. In: *Proceedings of the COBEM: 19th International Congress of Mechanical Engineering*. CD-ROM.
42. Matelli, J.A., Rossa, J.A. e Bazzo, E. (2007) On the parameters of performance of combined colling and power plants. In: *Proceedings of the ECOS:20th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*. Vol. 2. pp 987-992.
43. Mecabô, L. (2007) Desenvolvimento de um protótipo de sistema especialista para apoio à manutenção de turbocompressores de gás natural. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
44. Melli, R. e Sciubba, E. (1997) A prototype expert system for the conceptual synthesis of thermal processes. *Energy Conversion and Management*. Vol. 38. No 15-17. pp 1737-1749.
45. Melli, R., Paoletti, B. e Sciubba, E. (1992) SYSLAM: An interactive expert system approach to power plant design and optimization. *International Journal of Energy-Environment-Economics* . Vol 2. No 3. pp 165-175.
46. Mizsey, P. e Fonyo, Z. (1990) Toward a more realistic overall process synthesis – the combined approach. *Computers & Chemical Engineering*. Vol. 14. No 11. pp 1213-1236.

47. Newell, A. e Simon, H. A (1963) GPS, a program that simulates human thought. New York: McGraw-Hill.
48. Orlando, J. A. (1996). Cogeneration design guide. Atlanta: ASHRAE.
49. Pahl, G., Beitz, W., Feldhusen, J., Grote, K. (2007) Engineering design: a systematic approach. Berlin: Springer.
50. Patel, V. Introduction To HRSG Design. Disponível em:
<<http://www.hrsdesign.com/>>. Acesso em: 23 agosto 2007.
51. Plant, R. e Antoniou, G. (1999) Editorial: special issue on verification and validation. Knowledge-Based Systems. Vol. 12. N° 1-2. pp 1-2.
52. Rossa, J. A. (2007). Estudo teórico e experimental de um sistema compacto de cogeração consistindo de uma máquina refrigeração por absorção água-amônia e microturbina a gás natural. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
53. Rücker, C. P. R. (2004) Análise exergoeconômica de uma planta de cogeração baseada em microturbina a gás natural e refrigeração por absorção. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
54. Schank, R. C. (1982) Dynamic memory: a theory of reminding and learning in computers and people. Cambridge: Cambridge University Press.
55. Schank, R. C. e Abelson, R. P. (1977) Scripts, plans goals and understanding: an inquiry into human knowledge structures. Hillsdale: LEA.
56. Seuranen, T., Hurme, M. e Pajula, E. (2005) Synthesis of separation processes by case-based reasoning. Computers and Chemical Engineering. Vol. 29. No 6. pp 1473-1482.
57. Silva, J. C. (1998) Expert system prototype for hydraulic system designs focusing on concurrent engineering aspects (em inglês). Tese de doutorado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.

58. Silva, J. C. e Back, N. (2000) Shaping the process of fluid power system design applying an expert system. *Research in Engineering Design*. Vol. 12. No 3. pp 08-17.
59. Starr, R. R. (2006) Contribuições para a detecção de vazamentos em tubulações de gás natural: uma abordagem baseada em conhecimento. Dissertação de mestrado: Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Brasil.
60. Stoecker, W. F. (1989). *Design of thermal systems*. New York: McGraww-Hill.
61. Tsatsaronis, G. e Pisa, J. (1994). Exergoeconomic evaluation and optimization of energy systems – application to the CGAM problem. *Energy*. Vol. 19. No 3. pp 287-321.
62. UML (2007) *The Unified Modeling Language*. Object Management Group. Disponível em: <<http://www.uml.org>>. Acesso 08 agosto 2007.
63. Vargas, J. E. e Raj, S. (1993) Developing maintainable expert system using case-based reasoning. *Expert Systems*. Vol. 10. No 4. pp 219-225.
64. Wangenheim, C. G. e Wangenheim, A. (2003) *Raciocínio baseado em casos*. Barueri: Editora Manole.
65. Watson, I. (1997) *Applying case-based reasoning: techniques for enterprise systems*. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers.
66. Watson, I. e Marir, F. (1994). Case-Based Reasoning: A Review. *The Knowledge Engineering Review*. Vol. 9. No. 4. pp 355-381.
67. Willard, B. (2007) UML for systems engineering. *Computer Standards & Interfaces*. Vol. 29. No 1. pp 69-81.

APÊNDICE A: TAXA DE ENERGIA PRIMÁRIA

A eficiência global é um parâmetro geralmente utilizado para se quantificar economia de combustível, de tal modo que uma planta que apresente maior eficiência global economiza mais combustível que outra para produzirem a mesma quantidade de energia útil. Entretanto, uma planta de cogeração que produza energia elétrica e água gelada (PCEAG) é uma combinação apropriada de dois tipos de máquinas térmicas: motores e refrigeradores. Considerando-se um volume de controle englobando toda a planta, ela pode ser vista como um motor e refrigerador ao mesmo tempo, por causa dos efeitos (trabalho e remoção de calor) causados simultaneamente por esse sistema aberto na sua vizinhança. Dessa dualidade, algumas armadilhas conceituais podem surgir ao se utilizar a eficiência global como parâmetro de desempenho de uma PCEAG.

O questionamento natural que surge é o significado do termo “eficiência” para plantas desse tipo. De acordo com Çengel e Boles (2002), uma razão para se expressar a eficiência de refrigeradores pelo COP é o desejo de se evitar a inconveniência de se ter eficiências maiores que 1, porque a eficiência térmica, da maneira que é definida para motores, é um parâmetro que nunca pode exceder 1. Mas, uma vez que uma PCEAG é tanto um motor como um refrigerador, ela pode eventualmente remover uma quantidade de calor de um ambiente refrigerado que pode ser maior que a quantidade de energia contida no combustível que a planta consome. Conseqüentemente, o termo “eficiência” não tem significado para plantas desse tipo. De fato, a eficiência de um motor térmico indica a quantidade de energia *contida* no combustível que é convertida em trabalho, mas numa PCEAG o calor removido do espaço refrigerado *não está contido* no combustível. Assim, a eficiência global não é um parâmetro de desempenho adequado por que:

- i. Pode se conduzir a erros de interpretação com relação ao conteúdo energético do combustível;
- ii. É um parâmetro que não pode ser maior que 1.

Um parâmetro encontrado na literatura (Kong et al., 2005; Havelský 1999) que contorna essas limitações é a taxa de energia primária α (*primary energy rate*), mostrado na Eq. A.1

$$\alpha = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_f}{\dot{Q}_c} \quad (\text{A.1})$$

Assim como o COP e a eficiência, quanto maior a taxa de energia primária da planta, maior sua economia de combustível. A Eq. A.1 também reflete a dualidade de uma PCEAG, como mostrado na Figura A.1 e na Eq. A.2:

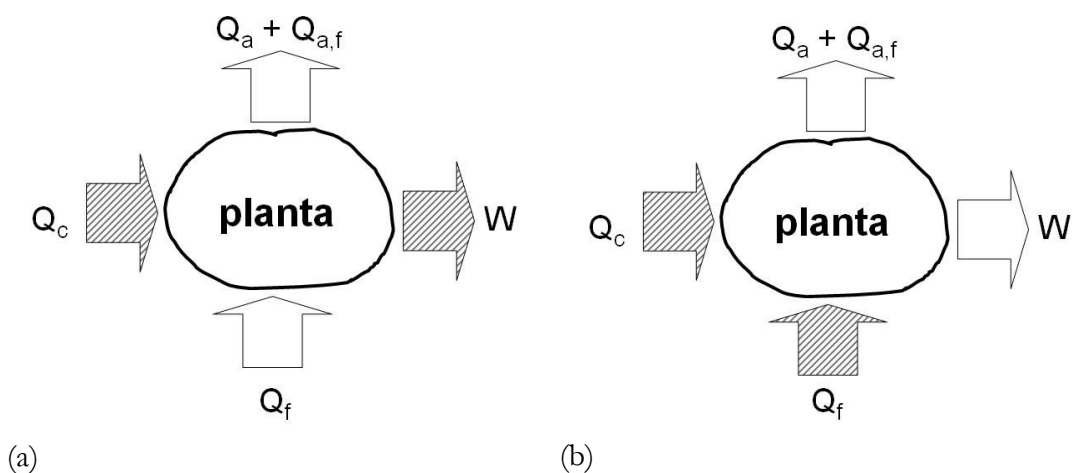


Figura A.1. Dualidade de uma PCEAG: (a) motor; (b) refrigerador.

$$\alpha = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_c} + \frac{\dot{Q}_f}{\dot{Q}_c} = \eta + \text{COP} \quad (\text{A.2})$$

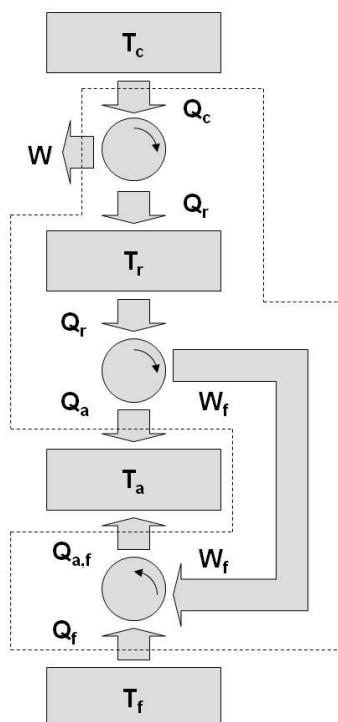


Figura A.2. Planta baseada em máquinas de Carnot.

A aplicação da taxa de energia primária em uma planta baseada em máquinas (motores e refrigerador) de Carnot permite avaliar a consistência termodinâmica desse parâmetro³². Considere três máquinas de Carnot formando uma PCEAG, como mostrado na Fig. A.2 (note que essa representação é uma extensão da Fig. A.1). Uma delas é um motor operando entre um reservatório de calor na temperatura da queima do combustível T_c , e outro na temperatura de recuperação de calor T_r . O trabalho W produzido por esse motor corresponde ao trabalho líquido disponibilizado pela planta. Outra máquina é um motor operando entre o reservatório de calor na temperatura de recuperação de calor T_r , e outro na temperatura ambiente T_a . O trabalho W_f produzido por esse motor aciona a última das máquinas de Carnot, um refrigerador que opera entre o reservatório correspondente ao espaço refrigerado T_f e o ambiente. Na Figura A.3 é mostrado o balanço de energia da planta.

³² Essa análise é válida para máquinas refrigeradoras. Uma análise similar para bombas de calor foi conduzida por Matelli et al. (2007).

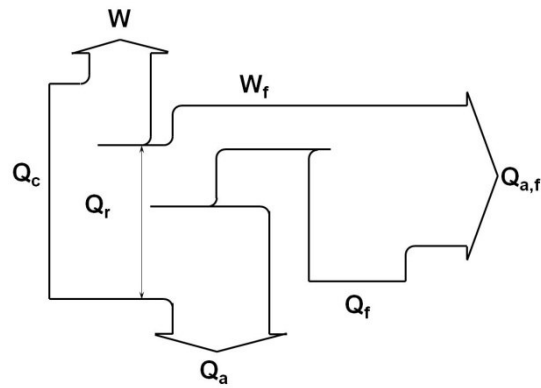


Figura A.3. Balanço de energia da planta de Carnot.

Uma expressão da máxima taxa de energia primária para uma PCEAG que dependa apenas das temperaturas dos reservatórios é obtida como mostrado a seguir:

$$W = \eta_{cr,1} Q_c \quad (A.3)$$

$$Q_f = COP_{cr} W_f \quad (A.4)$$

Substituindo as Eqs. A.3 e A.4 na Eq. A.2 tem-se:

$$\alpha_{cr} = \frac{\eta_{cr,1} Q_c + COP_{cr} W_f}{Q_c} \quad (A.5)$$

Mas:

$$W_f = \eta_{cr,2} Q_r \quad (A.6)$$

$$Q_r = (1 - \eta_{cr,1}) Q_c \quad (A.7)$$

Substituindo as Eqs. A.6 e A.7 na Eq. A.5 tem-se:

$$\alpha_{cr} = \eta_{cr,1} + \eta_{cr,1} COP_{cr} (1 - \eta_{cr,1}) \quad (A.8)$$

Uma vez que os motores e o refrigerador são máquinas de Carnot, suas eficiências e coeficiente de performance dependem somente das temperaturas absolutas dos reservatórios de calor. Substituindo as respectivas temperaturas na Eq. A.8, finalmente se tem:

$$\alpha_{cr} = 1 + \frac{2T_f T_c - T_a(T_r + T_f)}{T_c(T_a - T_f)} \quad (A.9)$$

O segundo termo do lado direito da Eq. A.9 pode ser positivo ou negativo. No primeiro caso, a taxa de energia primária é maior que 1. Para temperaturas usuais, tais como $T_c = 2100$ K, $T_r = 363$ K; $T_a = 300$ K e $T_f = 295$ K, $\alpha_{cr} = 2,597$. O balanço de energia para $Q_c = 1000$ J é mostrado na Figura A.4. De modo geral, $\alpha_{cr} \geq 1$ se:

$$T_r \geq \frac{T_f T_a}{2T_f - T_a} \quad (A.10)$$

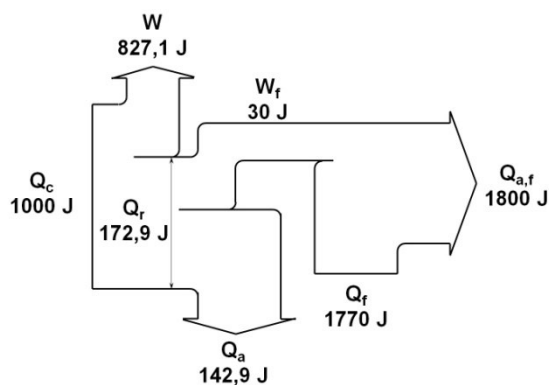


Figura A.4. Balanço de energia da planta de Carnot para $Q_c = 1000$ J.

É interessante investigar o comportamento da taxa de energia primária em situações limites, quando T_r tende a T_a e quando T_r tende a T_c , como mostrado pelas Eqs A.11 e A12, respectivamente:

$$\lim_{T_r \rightarrow T_a} \alpha_{cr} = 1 - \frac{T_a}{T_c} = \eta_{cr}^{T_r \rightarrow T_a} \quad (A.11)$$

$$\lim_{T_r \rightarrow T_c} \alpha_{cr} = \frac{T_f(T_c - T_a)}{T_c(T_a - T_f)} = \eta_{cr}^{T_r \rightarrow T_c} \text{COP}_{cr}^{T_r \rightarrow T_c} \quad (A.12)$$

A situação expressa pela Eq. A.11 se refere ao caso onde não há recuperação de calor (Figura A.5a). Logo, não se produz trabalho para o refrigerador; nenhum efeito de refrigeração é observado e a taxa de energia primária se reduz à eficiência de um motor que opera entre os reservatórios T_c e T_a , e a planta se reduz a uma planta de ciclo aberto simples. Já a Eq. A.12 se refere a uma situação onde todo o trabalho produzido pelo motor é usado para acionar o refrigerador (Figura A.5b). Logo, a planta se reduz a um refrigerador, de tal modo que a taxa de energia primária se reduz ao COP do refrigerador (operando entre os reservatórios T_f e T_a) penalizada pela eficiência do motor (operando entre T_r e T_a). Em outras palavras, a eficiência do motor pode ser vista como um fator de correção do COP, porque o trabalho vem, de fato, de um motor que queima algum combustível.

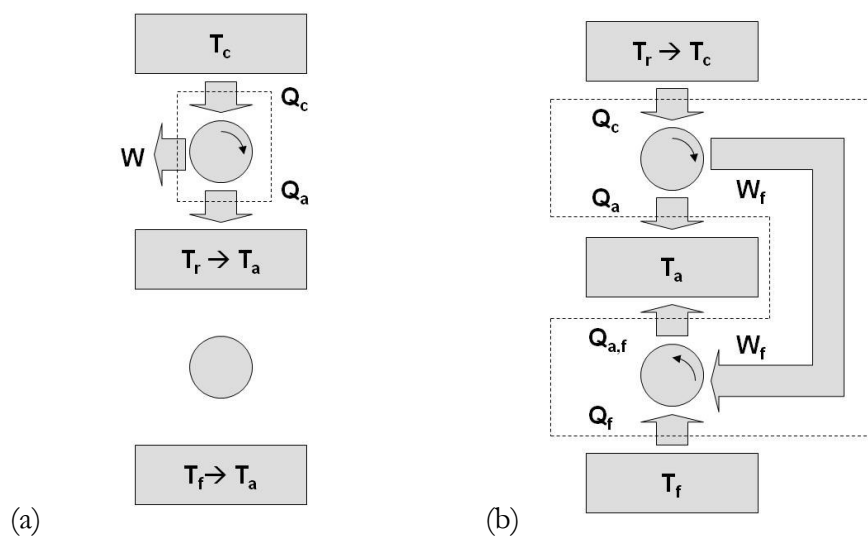


Figura A.5. PCEAG reduzida a um motor (a) e a um refrigerador (b).

APÊNDICE B: ALGUMAS REGRAS PRINCIPAIS

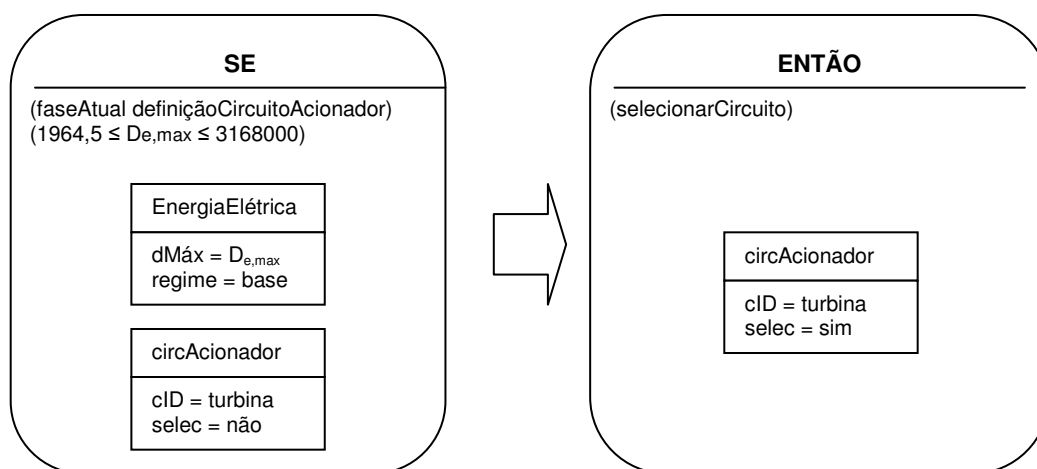


Figura B.1. Regra para seleção do circuito acionador baseado em turbina.

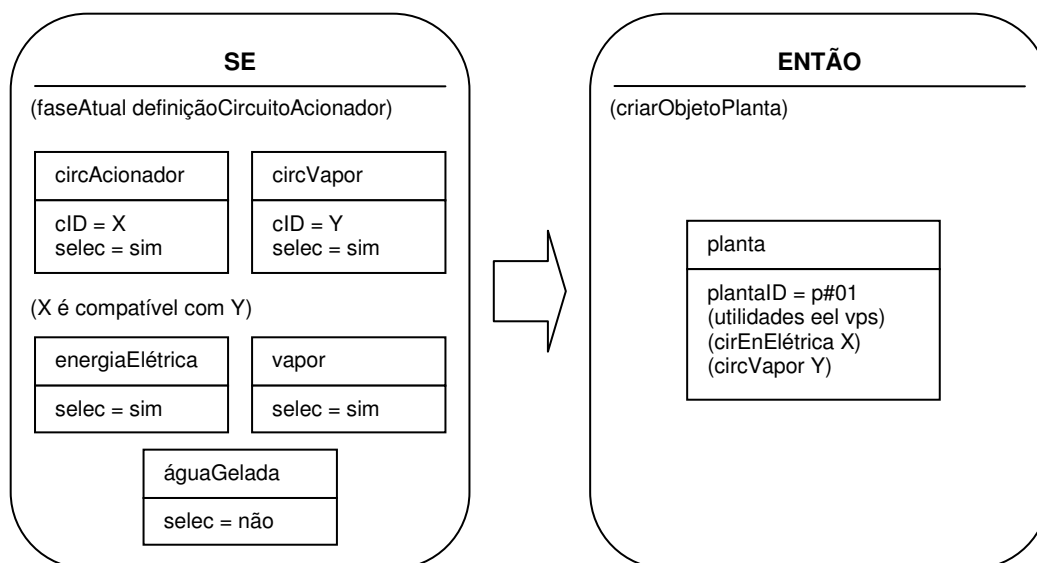


Figura B.2. Regra para combinação de circuitos de energia elétrica e vapor saturado.

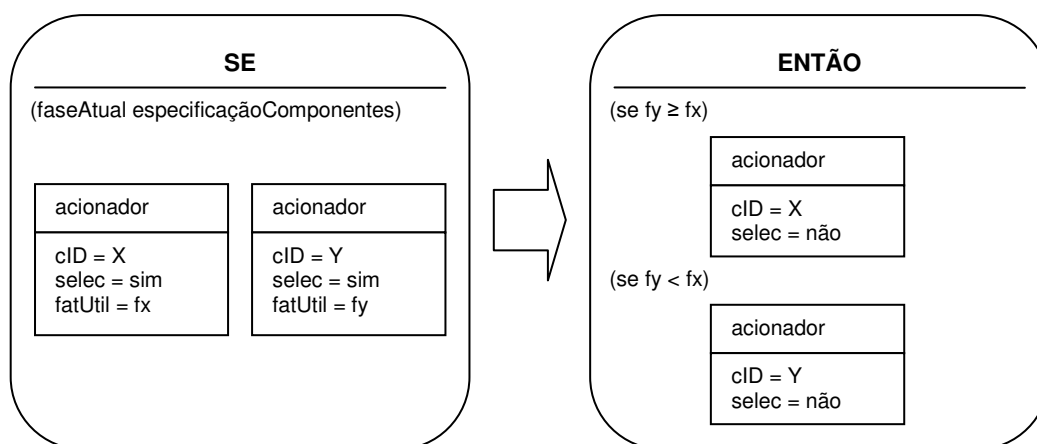


Figura B.3. Regra de otimização: escolha do acionador que apresenta o melhor fator de utilização.

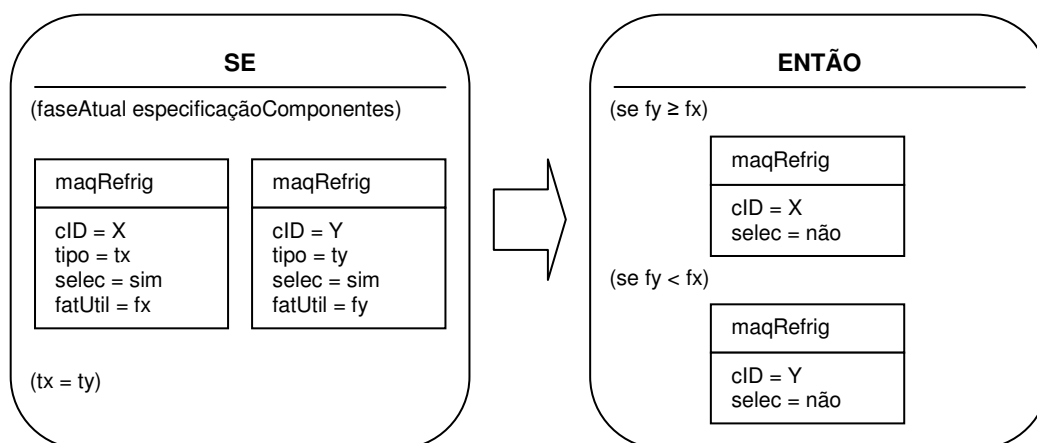


Figura B.4. Regra de otimização: escolha da máquina de refrigeração que apresenta o melhor fator de utilização.

APÊNDICE C: ATRIBUTOS DE UM CASO

caso-ID
 similaridadeGlobal
 casoRecuperado

*** ATRIBUTOS DO PROBLEMA ***

aplicaçãoDaPlanta
 modoDeOperação
 demandaElétricaMáxima
 demandaElétricaMínima
 consumoDiárioDeEnergia
 pressãoDeVaporRequerida
 vazãoDeVaporRequerida
 retornoDeCondensadoRequerido
 temperaturaDeCondensadoRequerida
 cargaTérmicaMédiaRequerida

*** ATRIBUTOS DA SOLUÇÃO ***

*** COMPONENTES ***

*** ACIONADOR PRIMÁRIO ***

tipoDoAccionador
 modeloDoAccionador
 potênciaDoAccionador
 eficiênciaDoAccionador
 númeroDeAccionadores

*** MÁQUINA DE ABS. A VAPOR (MAV) ***

mavSelecionada
 modeloDaMAV
 capacidadeDaMAV
 COPDaMAV
 vazãoDeVaporDaMAV
 númeroDeMAVs

*** MÁQUINA DE ABS. A ÁGUA QUENTE (MAAQ) ***

maaqSelecionada
 modeloDaMAAQ
 capacidadeDaMAAQ
 COPDaMAAQ
 vazãoDeÁguaQuenteDaMAAQ
 númeroDeMAAQs

*** MÁQUINA DE COMPRESSÃO MECÂNICA (MCM) ***

mcmSelecionada
 funçãoDaMCM
 modeloDaMCM
 capacidadeDaMCM
 COPDaMCM
 energia elétricaRequeridaPelamCM
 númeroDeMCMs

*** CALDEIRA DE RECUPERAÇÃO (CR) ***

crSelecionada
 pressãoDaCR
 capacidadeDaCR
 vazãoDeVaporMáximaDaCR
 vazãoDeVaporDaCR
 vazãoDaExaustãoDaCR
 temperaturaDeEntradaDaExaustãoDaCR
 temperaturaDeSaídaDaExaustãoDaCR
 temperaturaDoCondensadoDaCR
 temperaturaDoVaporDaCR
 pinchPointDaCR
 approachPointDaCR
 númeroDeCRs

*** CALDEIRA A GÁS (CG) ***

CGSelecionada
 funçãoDaCG
 capacidadeDaCG
 vazãoDeVaporMáximaDaCG
 vazãoDeVaporDaCG

númeroDeCGs

*** TROCADOR DE CALOR ÁGUA-ÁGUA (TCAA) ***

tcaaSelecionado
calorTrocadoNoTCAA
vazãoDeFluidoQuenteNoTCAA
vazãoDeFluidoFrioNoTCAA
temperaturaDeEntradaDoFluidoQuenteNoTCAA
temperaturaDeSaídaDoFluidoQuenteNoTCAA
temperaturaDeEntradaDoFluidoFrioNoTCAA
temperaturaDeSaídaDoFluidoFrioNoTCAA
númeroDeTCCAs

*** TROCADOR DE CALOR GÁS-ÁGUA (TCGA) ***

tcgaSelecionado
calorTrocadoNoTCGA
vazãoDeFluidoQuenteNoTCGA
vazãoDeFluidoFrioNoTCGA
temperaturaDeEntradaDoFluidoQuenteNoTCGA
temperaturaDeSaídaDoFluidoQuenteNoTCGA
temperaturaDeEntradaDoFluidoFrioNoTCGA
temperaturaDeSaídaDoFluidoFrioNoTCGA
númeroDeTCCAs

*** ATRIBUTOS DE DESEMPENHO DA PLANTA ***

*** CAPACIDADE INSTALADA (kw) ***

capacidadeInstaladaDeEnergia elétricaDaPlanta
capacidadeInstaladaDeVaporDaPlanta
capacidadeInstaladaDeÁguaGeladaDaPlanta

*** POTÊNCIA DISPONIBILIZADA (kw) ***

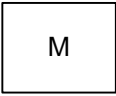


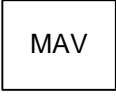
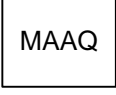
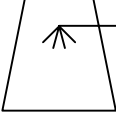


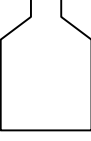
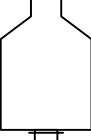
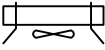
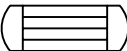

potênciaDisponibilizadaDeEnergia elétricaDaPlanta
potênciaDisponibilizadaDeVaporDaPlanta
potênciaDisponibilizadaDeÁguaGeladaDaPlanta

*** DESEMPENHO ***

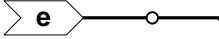
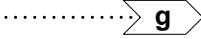
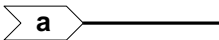
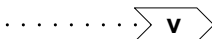
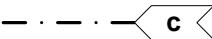


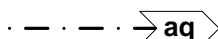
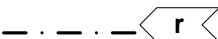


consumoDeGásDaPlanta
consumoDeGásDosAccionadores
consumoDeGásDaCaldeiraAGás
consumoDeÁguaDaPlanta
taxaDeEnergiaPrimáriaDaPlanta
fatorDeUtilizaçãoDaPlanta
fatorDeUtilizaçãoDeEnergia elétricaDaPlanta
fatorDeUtilizaçãoDeVaporDaPlanta
fatorDeUtilizaçãoDeÁguaGeladaDaPlanta

ANEXO: LEGENDA DOS DIAGRAMAS

COMPONENTES

	Motor
	Turbina
	Gerador
	Máquina de refrigeração por absorção a vapor
	Máquina de refrigeração por absorção a vapor
	Torre de resfriamento
	Bomba
	Tanque de termoacumulação
	Caldeira de recuperação
	Caldeira de recuperação com pós-queimador
	Radiador
	Trocador de calor água-água
	Trocador de calor gás-água

MASSA/ENERGIA

	Energia elétrica
	Gás natural
	Água
	Vapor saturado
	Retorno de condensado
	Água gelada
	Retorno de água gelada
	Água quente
	Retorno de água quente
	Gases de exaustão
	Água das camisas