

FELIPE SEABRA VIEIRA

**Desenvolvimento de sistema especialista para a geração automática de
superestruturas para síntese e otimização de sistemas térmicos**

Felipe Seabra Vieira

**Desenvolvimento de sistema especialista para a geração automática de
superestruturas para síntese e otimização de sistemas térmicos**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli
Co-orientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri

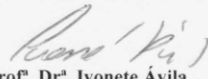
V658d	<p>Vieira, Felipe Seabra</p> <p>Desenvolvimento de sistema especialista para a geração automática de superestruturas para síntese e otimização de sistemas térmicos / Felipe Seabra Vieira. – Guaratinguetá, 2019.</p> <p>78 f : il.</p> <p>Bibliografia: f. 64-68</p> <p>Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2019.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli</p> <p>Coorientador: Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri</p> <p>1. Energia elétrica e calor - Cogeração. 2. Energia. 3. Inteligência artificial - Engenharia de Aplicações. 4. Otimização estrutural. I.Título.</p>
	CDU 536.72(043)

FELIPE SEABRA VIEIRA

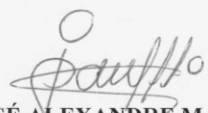
ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
“MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA”

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

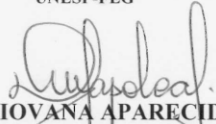
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO


Prof. Dr. Ivonete Ávila
Coordenadora

BANCA EXAMINADORA:


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MATELLI
Orientador / UNESP-FEG


Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JÚNIOR
UNESP-FEG


Prof. Dr. DIOVANA APARECIDA DOS
SANTOS NAPOLEÃO
EEL/USP

Março de 2019

DADOS CURRICULARES

FELIPE SEABRA VIEIRA

NASCIMENTO	08.06.1992 – Guaratinguetá / SP
FILIAÇÃO	Marcos Renato Vieira Denise Seabra Teixeira Vieira
2007/2009	Ensino Médio: Técnico em Eletrônica Colégio Técnico e Industrial de Guaratinguetá
2011/2017	Curso de Graduação em Engenharia Mecânica Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”
2018/2019	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”

dedico este trabalho,
de modo especial, à minha família

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior- Brasil (CAPES) - código de financiamento 001.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus por ter andado comigo durante toda minha vida, ao meu orientador, Prof. Dr. José Alexandre Matelli e ao meu co-orientador, Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri que tornaram possível este trabalho, por terem sido tão prestativos e atenciosos,

a minha esposa Ester, que me deu suporte, mesmo em tempos difíceis, para que esse trabalho fosse possível,

aos meus pais Marcos e Denise, que sempre estiveram ao meu lado, sendo a base do meu progresso na vida,

às funcionárias da Biblioteca do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

a CAPES, pelo financiamento da bolsa de mestrado, o que possibilitou a dedicação exclusiva para este trabalho.

RESUMO

Por estar relacionado com questões econômicas e ambientais, o uso eficiente de energia é atualmente alvo de diversos estudos e pesquisas. A demanda energética, tanto elétrica quanto térmica, está presente nos mais diversos setores, tais como, indústrias, condomínios residenciais, cidades, comércios e hospitais. Para que tais demandas sejam supridas, com o melhor aproveitamento energético possível, surge o conceito de cogeração. Cogeração pode ser entendida como a geração de dois ou mais tipos de energia (trabalho mecânico, energia elétrica, calor ou energia de resfriamento) a partir de uma única fonte energética. O projeto, porém, de um sistema térmico de cogeração pode apresentar uma complexidade muito elevada. Isso se deve, dentre outras razões, aos diversos tipos e tamanhos de tecnologias existentes, além das inter-relações complexas dos parâmetros de um sistema (tais como pressões, temperaturas, vazões e eficiências em carga parcial). Surgem, então, diversas possibilidades de configurações de sistemas para se atender aos requisitos de um projeto, fazendo com que a busca pela solução ótima seja complexa. A solução ótima depende fortemente da superestrutura, no sentido que diferentes superestruturas resultam em diferentes soluções ótimas. No entanto, a criação de superestruturas não é feita, em geral, de modo sistemático, dependendo em grande medida das preferências, da experiência e criatividade de quem a propõe. Neste trabalho foi desenvolvido um método de projeto que usa inteligência artificial para gerar superestruturas de modo automático, o que, combinada com algoritmos de otimização, reduziu-se a complexidade de projeto de sistemas térmicos, contudo, sem desconsiderar a solução ótima real.

PALAVRAS-CHAVE: Cogeração. Sistemas baseado em conhecimento. Otimização. Projeto de sistemas térmicos. Energia.

ABSTRACT

The efficient use of energy is currently the target of several studies and researches, because it is related to economic and environmental issues. Energy demand, both electric and thermal, is present in the most sectors, such as industries, residential condominiums, cities, shops and hospitals. In order for these demands to be met, with the best possible energy utilization, the concept of cogeneration arises. Cogeneration can be understood as the generation of two or more types of energy (mechanical work, electric energy, heat or cooling energy) from a single source of energy. However, the design of a cogeneration system can be very complex. This is due, among other reasons, to the various types and sizes of existing technologies, as well as the complex interrelations of system's parameters (such as pressures, temperatures, flows and partial load efficiencies). For this reason, there are several possible configurations of systems that can meet the requirements of a project, making the search for the optimal solution complex. The optimal solution depends strongly on the superstructure, in the sense that different superstructures result in different optimal solutions. However, the creation of superstructures is not generally done in a systematic way, depending to a great extent on the preferences, experience and creativity of the proposer. In this work, a design method was developed that uses artificial intelligence to generate superstructures in an automatic way, which, combined with optimization algorithms, reduced the design complexity of thermal systems, however, without disconsider the real optimal solution.

KEYWORDS: Cogeneration. Knowledge based system. Optimization. Design of thermal systems. Energy.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	14
2.1	CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO	14
2.1.1	Classificação de acordo com acionador principal	14
2.1.2	Classificação de acordo com sequência de uso de energia	14
2.1.3	Classificação de acordo com o tamanho da central de cogeração	15
2.2	CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DE UM SISTEMA TÉRMICO.....	16
2.3	VISÃO GERAL SOBRE ACIONADORES PRIMÁRIOS.....	20
2.3.1	Motores de combustão interna	20
2.3.2	Turbinas a gás	21
2.3.3	Microturbinas	22
2.3.4	Turbinas a vapor	22
2.3.5	Outros acionadores primários	23
2.4	VISÃO GERAL SOBRE MÉTODOS DE PROJETO	24
2.4.1	Projeto de sistemas térmicos através de ferramentas de otimização	24
2.4.2	Inteligência artificial	29
2.4.3	Outros métodos de projeto	33
2.5	PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO.....	34
3	MATERIAL E MÉTODO	37
3.1	SISTEMA ESPECIALISTA	41
3.2	FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO.....	42
3.3	OUTROS ASPECTOS CONSIDERADOS NO PROJETO DE SISTEMAS TÉRMICOS	46
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1	ESTUDO DE CASO 1: LAVANDERIA INDUSTRIAL.....	51

4.2	ESTUDO DE CASO 2: <i>SHOPPING CENTER</i>	52
4.3	ESTUDO DE CASO 3: INDÚSTRIA.	54
4.4	ESTUDO DE CASO 4: HOSPITAL UNIVERSITÁRIO.	56
4.5	ANÁLISE DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO	59
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
5.1	CONCLUSÃO	62
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	62
	REFERÊNCIAS	64
	APÊNDICE A – NOMENCLATURA UTILIZADA NA OTIMIZAÇÃO	69
	APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO 9	71

1 INTRODUÇÃO

Há nos dias de hoje uma preocupação com uso racional de energia e suas fontes. Isso se deve ao fato de não haver demandas de energia térmica e elétrica apenas no setor industrial, mas também no dia-a-dia de instalações prediais como, por exemplo, em residências, *shoppings*, aeroportos e hospitais. Com isso, o uso eficiente de energia se torna cada vez mais importante, pois o tema tem forte viés econômico relacionado a custos e, principalmente no setor empresarial, à competitividade. Há também o viés ambiental, relacionado à disponibilidade de fontes de energia e impactos associados às atividades de conversão e de geração de energia.

Centrais termelétricas tradicionais apresentam eficiência elétrica de aproximadamente 30%, sendo que a maior parte da energia fornecida pelo combustível é perdida na forma de calor, pelo fato de não se aproveitar o calor presente nos gases de exaustão de equipamentos que geram energia a partir de queima de combustíveis e, também, de não se aproveitar o calor retirado dos equipamentos por sistemas de arrefecimento, quando existentes.

Em busca do uso mais eficiente de energia, o projeto de sistemas térmicos de cogeração de energia térmica, energia elétrica e refrigeração (CCHP – *Combined Cooling, Heat, and Power*) tem se mostrado efetivo quando se trata em reduzir uso de energia primária e emissão de CO₂ quando comparado com sistemas convencionais de geração de energia (denominados “sistemas separados” ou de “geração separada”) (ZHU et al., 2017).

Como o conceito de cogeração traz consigo grandes vantagens técnicas e ambientais, este vem sendo incentivado em uma escala global. O uso de cogeração de calor e energia elétrica, a partir de queima de bagaço, faz com que o Brasil seja o primeiro em uso de bioenergia para aplicações industriais (REN21, 2018). Na Europa, a cogeração também é incentivada até mesmo em instalações prediais e residenciais (BRENNAN et al., 2012).

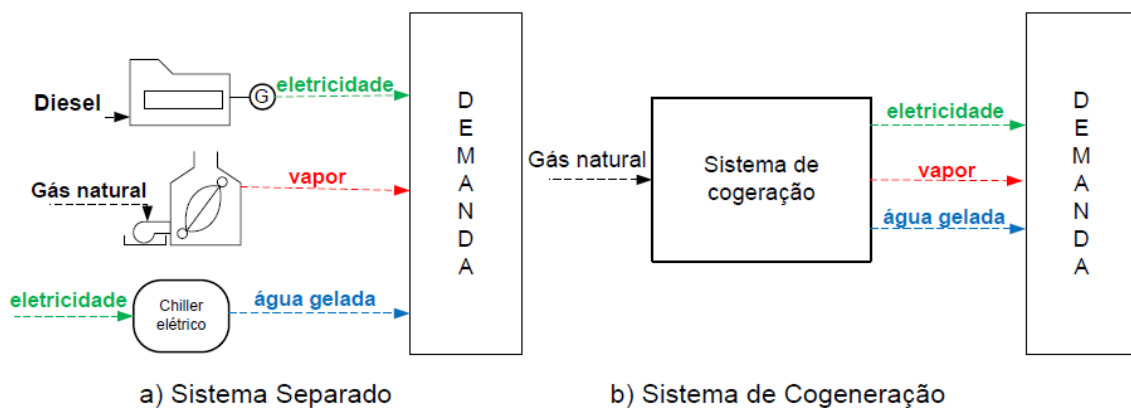
Sistemas separados, como são conhecidos os sistemas que fornecem energia, calor e/ou resfriamento de maneira separada, apresentam uma eficiência mais baixa (LIU; SHI; FANG, 2014). Estes sistemas são frequentemente usados como referência para avaliar a eficiência de sistemas de cogeração (LI et al., 2006; LIU; SHI; FANG, 2014; WEI et al., 2017; ZHANG et al., 2017). Sistemas de cogeração tem aplicação em diversos setores, tais como residencial, industrial ou comercial (BALESTIERI, 1994). A diferença entre sistemas de cogeração e sistemas separados é exemplificada na Figura 1.

É importante notar que alguns autores adotam a nomenclatura de cogeração como sendo a geração de calor e energia elétrica a partir de uma fonte única de energia (*combined heat and power* – CHP), enquanto a geração de calor, energia de resfriamento e energia elétrica é

denominada trigeração (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017; LIU; SHI; FANG, 2014). Neste trabalho, o conceito de cogeração é entendido como sendo a geração de duas ou mais formas de energia a partir de uma única fonte de energia.

O conceito de cogeração vem geralmente acompanhado, de maneira intrínseca, do conceito de geração sequencial de energia, isto é, a energia (geralmente térmica) liberada no processo de geração de eletricidade é utilizada para acionar alguma outra máquina térmica ou sistema térmico (como por ex., sistemas de refrigeração), aumentando eficiência global do sistema (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Enquanto geradores convencionais de eletricidade movidos a combustíveis fósseis alcançam em média eficiência menor que 40% (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017), sistemas de cogeração podem alcançar eficiência energética de aproximadamente 75% - 80%, ou mais (CHO; SMITH; MAGO, 2014). Por ser mais eficiente, a cogeração contribui com a redução da emissão de gases de efeito estufa (*greenhouse gas* – GHG), pois apresenta menor consumo de combustíveis do que os sistemas separados (LIU; SHI; FANG, 2014).

Figura 1 – Comparação entre sistema de geração separada e cogeração



Fonte: Produção do próprio autor.

O projeto de sistemas térmicos, que suprem a demanda de diferentes tipos de energia, pode ser bem complexo. Sistemas de cogeração têm sido amplamente estudados na busca de se encontrar soluções mais eficientes possíveis, que supram as mais diversificadas demandas. Segundo Matelli (2014), o projeto de uma central de cogeração é um problema de síntese sujeito a restrições termodinâmicas e, à medida que se aumenta sua complexidade, o número de soluções possíveis para o mesmo problema aumenta exponencialmente. O projeto se torna ainda mais complicado, quando são considerados diferentes objetivos, que uma central de cogeração pode ter (maximizar eficiência, minimizar custo de implantação e minimizar emissão de gases

prejudiciais, por exemplo). Para Balestieri (1994), um projeto de central de cogeração conceitualmente adequado, também consegue garantir o nível de excedentes energéticos, nos períodos ajustados pelo processo, com confiabilidade e eficiência.

Matelli (2014) estuda a complexidade computacional de um projeto de central de cogeração, através da comparação com o problema da “mochila”. Ele conclui que o problema pode ser definido com sendo “NP-completo”, ou seja, não há (ou é difícil de se encontrar) um algoritmo eficiente, para se projetar centrais de cogeração, que supram problemas de qualquer complexidade, encontrando soluções ótimas. Por isso, uso de programações não-convencionais, como programas de inteligência artificial, têm sido fortemente estudados para cumprimento desta tarefa.

O objetivo deste trabalho consiste em reduzir a complexidade de projeto de sistemas térmicos, através do desenvolvimento de um sistema especialista, que gera automaticamente superestruturas, a partir das quais os projetos finais serão obtidos por ferramentas matemáticas. Para tanto, o *shell* desenvolvido pela NASA, denominado CLIPS, será utilizado como ferramenta de desenvolvimento do sistema especialista e o software matemático LINGO 10, com licença concedida ao departamento de Energia da UNESP de Guaratinguetá, utilizado para obter matematicamente soluções ótimas de projeto, a partir da superestrutura gerada pelo sistema especialista.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 CLASSIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE COGERAÇÃO

Segundo Al Moussawi (2017), sistemas de cogeração podem ser classificados de acordo com o tipo de acionador primário (*prime mover*), a sequência de energia usada e o tamanho da central a ser projetada.

2.1.1 Classificação de acordo com acionador principal

O acionador principal é o componente mais importante do sistema de cogeração e tem a função de fornecer energia mecânica para o gerador elétrico, energia térmica para máquinas térmicas secundárias ou recuperadores de calor, assim como, energia para sistemas de refrigeração (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017; MATELLI; BAZZO; DA SILVA, 2009). Os principais tipos de acionadores primários são:

- Turbinas a gás
- Turbinas a vapor
- Microturbinas
- Ciclos combinados (ciclos que associam turbina(s) a gás e caldeiras de recuperação)
- Motores de combustão interna
- Tecnologias emergentes (por exemplo, células-combustível, motor Stirling, etc.).

De certa forma, o acionador principal também define segundo qual tipo de ciclo o sistema de cogeração opera. Existem diversos tipos de ciclo, tais como: ciclo de Rankine (acionador principal: turbina a vapor), ciclo Brayton (acionador principal: turbina a gás), ciclo Combinado (combinação dos ciclos Rankine e Brayton), ciclo Diesel (acionador principal: motor Diesel). Os principais ciclos usados em centrais de cogeração são os ciclos Rankine, Brayton e o combinado (BALESTIERI, 1994).

2.1.2 Classificação de acordo com sequência de uso de energia

Pode ser dividido em “*topping*” e “*bottoming*”¹. Quando se projeta o sistema para atender primeiramente a demanda térmica, diz-se que o ciclo opera em regime *bottoming*, enquanto, quando o sistema é projetado para atender primeiramente a demanda eletromecânica, regime *topping* (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017; BALESTIERI, 1994; MATELLI; BAZZO; DA SILVA, 2009).

A maioria dos processos industriais apresenta demandas térmicas de baixo nível entálpicos, o que favorece o emprego do regime *topping* (BALESTIERI, 1994). Também favorece este regime a limitação da venda de energia térmica, na forma de água quente, vapor ou água gelada, para clientes próximos, já que a distância favorece perdas térmicas. Já a venda de energia elétrica é mais simples, pois é possível transportar energia elétrica a longas distâncias, sem grande perda devido à transmissão.

2.1.3 Classificação de acordo com o tamanho da central de cogeração

Para Liu, Shi e Fang (2014), centrais podem ser classificadas em micro (abaixo de 20 kW), pequeno (20 kW a 1 MW), médio (1 MW a 10 MW) e grande porte (acima de 10 MW). Porém, pode haver divergências entre autores para esses valores estabelecidos (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017).

As aplicações típicas de sistemas, em suas diferentes escalas, são expostas em Al Moussawi, Fardoun e Louahlia (2017): microssistemas podem ser usados em instalações prediais, seja no âmbito comercial, residencial ou público; sistemas de cogeração de pequeno porte têm sido utilizados em supermercados, lojas de varejo, prédios comerciais e campi universitários; sistemas de médio porte são empregados em grandes fábricas, hospitais e escolas. Por sua vez, sistemas de grande porte podem prover uma quantidade substancial de energia elétrica para indústrias e uma grande quantidade de energia de aquecimento e resfriamento em universidades e distritos urbanos, com alta densidade populacional.

Os sistemas também podem ser classificados em 2 grupos: sistemas CCHP tradicionais de grande porte e sistemas de geração distribuída (*distributed CCHP*) (GU et al., 2014). Segundo GU et al. (2014a), os sistemas de geração distribuída apresentam grande uso global de energia (*overall energy use*), variando entre 70% - 90%, enquanto no caso das centrais típicas de geração de energia, o uso total de energia varia entre 30% - 45%. Os sistemas distribuídos contribuem para redução de emissão de poluentes.

¹ Não há tradução estabelecida, embora “*topping*” e “*bottoming*” possam ser entendidos como “superior” e “inferior”, respectivamente.

O projeto de sistemas de cogeração de grande porte e pequeno porte são bem diferentes. Para um projeto de sistema de grande porte, tem-se diversas opções de tecnologias, aumentando-se a quantidade de combinações possíveis, além de ser menos flexível quanto a mudanças na demanda, que podem prejudicar a vida do sistema (ZHU et al., 2017). Um sistema de cogeração frequentemente trabalha para atender cargas variáveis e fora do ponto nominal de projeto. Sistemas de grande porte apresentam baixo custo específico (US\$/kW) de investimento e alta eficiência térmica em carga total e baixa eficiência em carga parcial baixa, enquanto sistemas de pequeno porte apresentam baixa eficiência em carga total e alta eficiência em carga parcial baixa, porém alto custo específico de investimento (ZHU et al., 2017).

2.2 CARACTERÍSTICAS DE PROJETO DE UM SISTEMA TÉRMICO

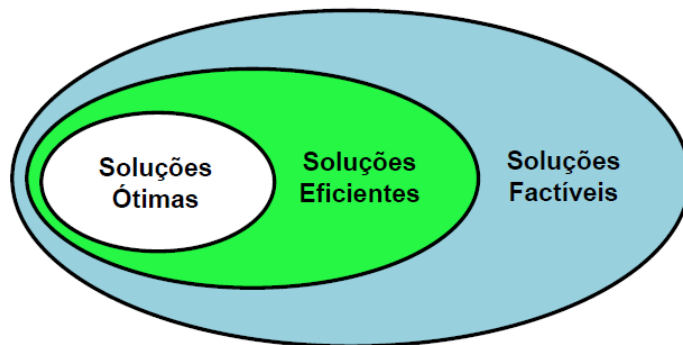
Uma das etapas críticas inicial de qualquer projeto é a definição das especificações de projeto, ou seja, quais requisitos o projeto deve atender. Bejan, George e Moran (1996) definem que do “universo” de soluções possíveis, que atendam as especificações de projeto, pode-se encontrar três tipos de soluções: factíveis, ótimas e quase-ótimas, também chamadas de “eficientes”, (BALESTIERI, 1994). As soluções factíveis são aquelas, que atendem todas especificações de projeto (BEJAN; GEORGE; MORAN, 1996). Dentre as soluções factíveis, sob uma perspectiva de otimização, e atentando-se apenas a uma variável, pode-se encontrar a solução ótima (BALESTIERI, 1994; BEJAN; GEORGE; MORAN, 1996). Soluções eficientes são aquelas que consideram um ou outro critério específico (fora das especificações) tornando a solução “satisfatória” (BALESTIERI, 1994). Soluções que não satisfazem os requisitos de projeto, são consideradas não-factíveis. As regiões de soluções possíveis de projeto estão explicitadas na Figura 2. A construção (passo-a-passo) de um projeto pode ser dividida nas seguintes etapas (STOECKER, 1998):

- 1) Definição da necessidade ou oportunidade;
- 2) Especificação do critério de sucesso;
- 3) Determinação da probabilidade de sucesso;
- 4) Análise de mercado;
- 5) Estimativa do custo de projeto do sistema;
- 6) Análise de viabilidade;
- 7) Pesquisa e Desenvolvimento;
- 8) Implementação.

A primeira etapa de um projeto é a definição de seu objetivo, ou seja, a definição de qual

necessidade/oportunidade se deseja suprir. Com objetivo de projeto bem definido, a segunda etapa visa esclarecer como ele pode ser alcançado (critérios de sucesso). Geralmente, o objetivo principal e os critérios de sucesso estão relacionados ao ganho financeiro, muito embora, nos dias atuais, projetos de sistemas térmicos geralmente estão vinculados a objetivos secundários, como por exemplo, objetivos ambientais e sociais.

Figura 2 - Tipos possíveis de soluções.



Fonte: adaptado de Balestieri (1994).

A terceira etapa de projeto consiste na determinação da probabilidade de sucesso, visando definir a incerteza relacionada à decisão de se seguir com o projeto baseada em conceitos estatísticos, como por exemplo, curvas de distribuição normal. Mesmo que uma ideia (ou projeto) seja tecnicamente excelente, é necessário se certificar que há mercado. Nesse sentido, a etapa 4 asseguram que o projeto não se desenvolva desnecessariamente.

Após a estimativa do custo de projeto, uma análise de viabilidade deve ser realizada, apontando se a execução do projeto é possível. Sendo o projeto possível, e economicamente viável, o processo de pesquisa e desenvolvimento é iniciado (etapa em que o projeto é realmente realizado). Por último, tem-se a implementação do projeto. É interessante notar que, caso a ideia do projeto tenha surgido através de pesquisa e desenvolvimento, a etapa 7 (sete) deve ser representado no lugar da etapa 1 (um) (STOECKER, 1998).

Pode-se dizer que este trabalho tem como escopo as etapas 2, 5 e 7. Sabendo-se a necessidade (objetivo) do projeto, supondo-o com alta probabilidade de sucesso e com mercado favorável, sistemas térmicos serão desenvolvidos, com a determinação de seus respectivos custos e análises de desempenho técnico e econômico (que podem ser entendidos como critérios de sucesso estabelecidos para os sistemas térmicos desenvolvidos).

Segundo Al Moussawi (2017), embora os aspectos técnicos e ambientais sejam levados em consideração, o principal pré-requisito de projeto acaba sendo o benefício econômico. Al

Moussawi (2017) lista os principais fatores a serem considerados em projeto como sendo:

- Investimento inicial e custo de capital.
- Custos de operação e manutenção.
- Preço de compra de combustível e eletricidade.
- Preço de venda de eletricidade e calor vendido fora do local, se aplicável.
- Maximização o uso de eletricidade gerada no local.
- Confiabilidade o funcionamento contínuo dos processos em condições nominais.
- Minimização de perdas de energia térmica gerada.
- Opção de armazenamento térmico.

Caso seja decidido que o sistema de cogeração será implantado, deve-se definir a sua estratégia de operação. Há quatro estratégias de operação diferentes (BALESTIERI, 1994):

• **Paridade térmica:** prioriza-se a atender a(s) demanda(s) térmica(s) e o excesso ou falta de energia elétrica pode ser vendido ou comprado por distribuidoras de energia elétrica e/ou outros consumidores;

• **Paridade elétrica:** prioriza-se atender à demanda elétrica. Caso haja excedente de energia térmica, pode-se liberá-la no ambiente, ou, se tecnicamente e economicamente possível, negociá-la com consumidores. Caso haja falta de energia térmica, pode-se instalar sistemas fornecedores suplementares, e/ou, se possível, comprar de fornecedores;

• **Despacho econômico:** corresponde à colocação da central de cogeração em funcionamento, apenas nos períodos em que a tarifa paga pela concessionária corresponda a um retorno de interesse do investidor;

• **Retirada da central de cogeração do sistema:** em casos da ociosidade da central de cogeração já existente, que gera custos por ociosidade dos equipamentos.

A resolução normativa da ANEEL n° 235, de 14 de novembro de 2006, define o conceito de cogeração e estabelece normas para que uma central termoelétrica seja considerada como cogeneradora. Essa norma se aplica a pessoa jurídica, física ou a empresas reunidas em consórcio, que produzam ou venham a gerar energia elétrica destinada ao serviço público ou produção independente; ou que gerem energia elétrica destinada à autoprodução, com excedente para comercialização temporária ou eventual.

É de interesse público, que sistemas térmicos de cogeração sejam preferencialmente implantados, ao invés de sistemas de geração separada de energia elétrica e térmica, pois a cogeração possibilita aproveitamento mais racional de fontes de energia. Caso a central termoelétrica atenda aos requisitos estabelecidos na resolução normativa ANEEL n° 235

(2006), o sistema de cogeração é considerado “cogeração qualificada”, e podem participar nas políticas públicas de incentivo à cogeração (como por exemplo, diminuição no preço da compra de gás natural). Os requisitos técnicos mínimos apresentados na norma para se considerar uma central como cogeração qualificada são apresentados nas equações 1 e 2.

$$\frac{Et}{Ef} \geq 15\% \quad (1)$$

$$\frac{Et}{Ef} \div X + \frac{Et}{Ef} \geq Fc\% \quad (2)$$

Os valores de “X” e “Fc” podem ser encontrados na Tabela 1.

Tabela 1 - Valores de “X” e “Fc%”

Fonte/potência elétrica instalada	X	Fc%
Derivados de Petróleo, Gás Natural e Carvão:		
Até 5 MW	2,14	41
Acima de 5 MW até 20 MW	2,13	44
Acima de 20 MW	2,00	50
Demais combustíveis:		
Até 5 MW	2,50	32
Acima de 5 MW até 20 MW	2,14	37
Acima de 20 MW	1,88	42
Calor recuperado de processo:		
Até 5 MW	2,60	25
Acima de 5 MW até 20 MW	2,17	30
Acima de 20 MW	1,86	35

Fonte: ANEEL n° 235 (2006).

Os termos presentes nas equações 1 e 2 são entendidos como:

Energia da utilidade calor (Et): energia cedida pela central termelétrica cogeradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, em termos líquidos, ou seja, descontando das energias brutas entregues ao processo as energias de baixo potencial térmico que retornam à central;

Energia da fonte (Ef): energia recebida pela central termelétrica cogeradora, no seu regime operativo médio, em kWh/h, com base no conteúdo energético específico, que no caso dos combustíveis é o Poder Calorífico Inferior (PCI);

Fator de ponderação (X): parâmetro adimensional definido em função da potência

instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, obtido da relação entre a eficiência de referência da utilidade calor e da eletromecânica, em processos de conversão para obtenção em separado destas utilidades. Valores do fator de ponderação em função do combustível, potência elétrica e potência térmica recuperada são encontrados na Tab. 1;

Fator de cogeração (Fc%): parâmetro definido em função da potência instalada e da fonte da central termelétrica cogeneradora, o qual aproxima-se do conceito de Eficiência Exergética. De modo semelhante ao fator de ponderação, os fatores de cogeração são encontrados na Tab.1.

2.3 VISÃO GERAL SOBRE ACIONADORES PRIMÁRIOS

O projeto de sistemas térmicos pode ser visto como um problema combinatorial de agrupamento de diversos equipamentos, de forma a definir a configuração de um sistema térmico, que atenda as demandas existentes. Logo, as características de cada equipamento devem ser consideradas, para decidir se este equipamento fará parte ou não de um sistema térmico, assim como, suas características operacionais (eficiência, por exemplo) influenciam diretamente no desempenho do sistema como um todo. Uma breve revisão teórica, sobre os principais equipamentos/máquinas térmicas utilizadas em sistemas de cogeração, é apresentada a seguir.

2.3.1 Motores de combustão interna

Os motores de combustão interna (MCI), também conhecidos como motores recíprocos ou de pistão, podem ser divididos em dois tipos: de ignição por centelha (*spark ignition*) e de ignição por compressão (*compression ignition*) (ISA; TAN; YATIM, 2018). Motores de combustão por centelha usam preferencialmente gás natural, mas podem usar propano, gasolina ou gás de aterro, enquanto motores de ignição por compressão usam diesel ou óleos pesados como combustível (LIU; SHI; FANG, 2014).

MCI's podem ser classificados como sendo de alta-velocidade (1000 – 3600 rpm), de média-velocidade (275 – 1000 rpm), ou de baixa-velocidade (58 – 275 rpm) (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). A capacidade dos motores com combustão interna (MCI) variam de 10 kW a 5MW (LIU; SHI; FANG, 2014). MCI's têm como vantagens o baixo custo capital, acionamento rápido (*quick starting*), bom funcionamento em regimes parciais de carga, com eficiências relativamente altas em cargas parciais, e alta confiabilidade (ISA; TAN;

YATIM, 2018; LIU; SHI; FANG, 2014).

Potência térmica pode ser obtida em MCIs por quatro meios diferentes: pelos gases de exaustão, pela água da jaqueta (usada para arrefecer o motor), pela água de resfriamento do óleo lubrificante e pelo resfriamento do turbo-compressor (se aplicável) (LIU; SHI; FANG, 2014). Tipicamente, o calor fornecido pelos gases de exaustão, água da jaqueta e óleo do motor representam 30%, 20% e 15% da quantidade de energia contida no combustível (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). A temperatura dos gases de exaustão pode estar entre 400°C - 600°C, enquanto a temperatura da água de jaqueta está entre 80°C - 90°C, sendo esses os dois meios principais usados para obtenção de energia térmica (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017).

Sistemas de cogeração baseados em motores de combustão interna são encontrados em aplicações de geração distribuída e em instalações residenciais, comerciais e industriais, geralmente apresentando capacidade menor que 5 MW (ISA; TAN; YATIM, 2018).

2.3.2 Turbinas a gás

Turbinas a gás operam segundo o ciclo Brayton, sendo geralmente movidas por gás natural ou combustíveis líquidos, como óleos combustíveis leves ou diesel (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Quando se usa gás natural como combustível, tem-se uma redução dramática na emissão de CO₂, quando comparado com outros tipos de acionadores primários, que usam combustíveis líquidos ou sólidos (LIU; SHI; FANG, 2014). As emissões de NO_x podem ser abaixo de 25 ppm, enquanto as emissões de CO são da faixa de 10 – 50 ppm (LIU; SHI; FANG, 2014). Turbinas a gás podem operar em ciclos abertos ou fechados. Em ciclos abertos, o ar é aquecido diretamente ao ser usado como comburente na câmara da combustão. Em ciclos fechados, gás hélio ou ar são os fluidos que acionam a turbina, sendo aquecidos indiretamente em um trocador de calor localizado na câmara de combustão (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017).

A potência gerada pode variar de 500 kW a valores superiores a 250 MW (LIU; SHI; FANG, 2014). A temperatura na câmara de combustão é restringida por motivos de resistência dos materiais da própria câmara e/ou das pás da turbina à altas temperaturas, geralmente atingindo o máximo de aproximadamente 1300°C (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017).

Os gases de exaustão apresentam temperaturas na faixa de 400°C - 600°C (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017), cujo calor pode ser recuperado para suprir

alguma demanda de calor útil de processo, para gerar vapor e acionar uma turbina a vapor, ou ainda, para alimentar algum sistema de refrigeração por absorção. A eficiência global do sistema (*overall energy efficiency*) pode chegar a 70 – 80% (LIU; SHI; FANG, 2014).

2.3.3 Microturbinas

Podem ser vistas como extensão de turbinas a gás, que operaram com vários tipos de combustíveis gasosos ou líquidos, gerando energia elétrica através de um gerador (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017; ISA; TAN; YATIM, 2018). A capacidade de geração de microturbinas pode variar de alguns kW até centenas de kW (LIU; SHI; FANG, 2014). Apresentam vantagens como baixa emissão de gases de efeito estufa (*greenhouse gases*) e pequeno tamanho e peso por unidade de potência gerada. Quando comparadas com motores de combustão interna, porém, apresentam desvantagens como baixa eficiência elétrica, maior investimento capital e maior sensibilidade às condições ambientais (LIU; SHI; FANG, 2014). Outras vantagens de microturbinas são a capacidade de serem usadas em paralelo com outras microturbinas para atender demandas maiores, menor nível de ruído e menor vibração do que MCI (ISA; TAN; YATIM, 2018). Assim como turbinas a gás, as microturbinas também apresentam com uma de suas características calor de alta qualidade saindo nos gases de exaustão (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017), que apresentam temperaturas na faixa de 260°C a 316°C (ISA; TAN; YATIM, 2018).

2.3.4 Turbinas a vapor

O ciclo termodinâmico de uma turbina a vapor é o ciclo de Rankine. Turbinas a vapor podem ser consideradas uma das tecnologias de acionador principal mais antigas e ainda presente nas instalações atuais (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Normalmente, a capacidade de geração de energia elétrica de turbinas a vapor pode assumir valores entre 50 kW e 250 MW (ISA; TAN; YATIM, 2018). A turbina a vapor transforma energia térmica proveniente de vapor pressurizado em energia de eixo ou energia elétrica. Em caldeiras que possuem fornalha, diversos combustíveis podem ser utilizados, tais como gás natural, lixo sólido, carvão, madeira e derivados de produtos agrícolas (ISA; TAN; YATIM, 2018).

As turbinas a vapor podem ser divididas em três tipos: de condensação, de extração e de extração com condensação. As turbinas de condensação entregam o vapor a uma pressão igual

ou inferior da pressão atmosférica, enquanto o vapor deixa a turbina de extração numa pressão superior à atmosférica (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017; ISA; TAN; YATIM, 2018). Por isso, turbinas de condensação geram uma maior quantidade de trabalho por unidade mássica de combustível do que turbinas de extração (ISA; TAN; YATIM, 2018). Porém, turbinas de extração geram energia térmica com elevado valor entálpico que, por vezes, é requerido em processos industriais.

Uma grande desvantagem de turbinas a vapor é a baixa eficiência elétrica em cargas parciais, não sendo, portanto, aplicáveis em centrais geradoras de pequeno porte (LIU; SHI; FANG, 2014).

2.3.5 Outros acionadores primários

Os acionadores primários anteriormente citados são os mais encontrados em aplicações práticas e cotidianas. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia, novos tipos de acionadores primários começam a ganhar espaço, tais como o motor Stirling e a célula-combustível.

Células-combustível convertem energia química em energia elétrica através da reação do hidrogênio com agentes oxidantes, resultando água como produto dessa reação. Essa tecnologia é mais cara do que motores Stirling (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Porém, como água é o único produto da reação, células-combustível podem ser consideradas o processo mais limpo de geração de energia, além de apresentar uma maior confiabilidade que turbinas a gás e MCI (LIU; SHI; FANG, 2014). Porém, uma desvantagem é a necessidade de se produzir hidrogênio, que exige alto consumo energético e libera gases poluentes (LIU; SHI; FANG, 2014). As células-combustível geram energia em corrente contínua, sendo necessário um transformador DC/AC na quase totalidade de aplicações.

Motores Stirling também são conhecidos como motores de combustão externa. Estes motores operam em ciclo fechado, ou seja, há uma quantidade fixa de fluido dentro do motor, que pode ser ar ou hélio (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Eles apresentam como vantagens alta eficiência global, bom desempenho em cargas parciais, baixa emissão de gases, baixa vibração e baixo nível de ruído (AL MOUSSAWI; FARDOUN; LOUAHLIA, 2017). Porém, apresentam como desvantagens baixa potência específica (quando comparados com MCI), alto custo de aquisição, dificuldade de se regular a potência de saída, além de sua eficiência cair com o aumento da temperatura ambiente (LIU; SHI; FANG, 2014).

Como estas tecnologias não são comercialmente maduras, elas não estão presentes no escopo do presente trabalho.

2.4 VISÃO GERAL SOBRE MÉTODOS DE PROJETO

2.4.1 Projeto de sistemas térmicos através de ferramentas de otimização

Existem diversos métodos para se projetar sistemas térmicos. Um desses métodos é considerar o projeto como um problema combinatório de otimização, expressando a escolha de um determinado equipamento como sendo uma variável binária, se o equipamento for escolhido para compor a configuração do sistema térmico a ser projetado, a variável binária correspondente assume o valor 1 (existente); caso contrário, a variável assume valor 0 (não existente) (YOKOYAMA; HASEGAWA; ITO, 2002). Uma técnica empregada que apresenta tal abordagem é a “programação linear inteira mista” (*mixed integer linear programming* – MILP).

O MILP é uma técnica proveniente da Programação Linear, que teve origem em pesquisa operacional (BARBOZA et al., 2015). MILP visa maximizar ou minimizar uma função, chamada de função objetivo, sujeita a um conjunto de equações que representam as restrições do modelo. A função objetivo e as restrições podem apresentar algumas variáveis que assumem valores inteiros, podendo-se estabelecer que tais variáveis apresentam valores binários 0 ou 1. Variáveis binárias podem representar diversas situações, tais como ligado/desligado, selecionado/não selecionado, existente/inexistente etc.

Um sistema de cogeração bem projetado deve balancear economia de custos, economia real de energia primária e emissão de poluentes (CHO; SMITH; MAGO, 2014). Tais objetivos dificilmente convergem entre si, ou seja, dificilmente o projeto de um sistema visando a máxima economia financeira resultará no mesmo sistema de um projeto visando a minimização de emissão de poluentes, mesmo quando projetados para atender a mesma demanda. Os projetos podem ter um objetivo único (mono-objetivo), como de maximizar custo ou eficiência, por exemplo, ou ter objetivos múltiplos (multiobjetivo), como de encontrar uma solução que esteja entre as soluções ótimas financeiras e técnicas, levando em consideração a ambos aspectos de projeto.

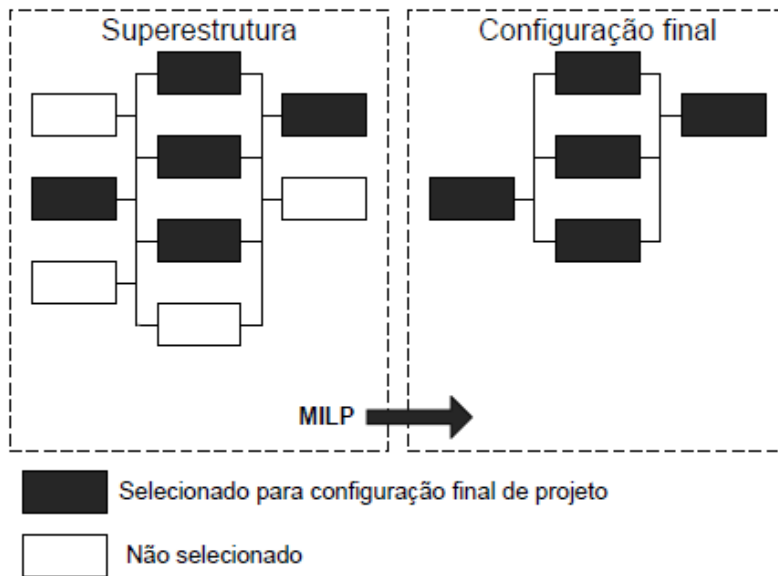
Assim como as funções-objetivo, as restrições de um modelo de otimização podem ser de diversas naturezas, como por exemplo, econômica (ex.: custos máximos e mínimos), técnica (ex.: balanço de energia e massa) e ambiental (ex.: máxima emissão de gases poluentes).

Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) empregaram MILP para projetar um sistema térmico que consome energia elétrica e gás natural para cogerar energia térmica e elétrica para um edifício ou distrito, conforme a demanda especificada. Para tanto, foi proposta uma

configuração inicial do sistema térmico com todos equipamentos considerados como “candidatos” para seleção da configuração final. A esta configuração inicial, que engloba em si diversas configurações dos equipamentos possíveis e necessários, se denomina “superestrutura”. A estrutura final foi obtida se escolhendo alguns dos equipamentos da superestrutura, de forma a obedecer a todas as restrições estabelecidas e a maximizar (ou minimizar) a função objetivo, como exemplificado na Figura 3.

Embora o trabalho proposto em Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) tivesse como objetivo a proposta de um método para se resolver problemas usando MILP de forma a ter menos esforço computacional, diversos aspectos do trabalho podem ser considerados como comuns a outros trabalhos de projeto de sistemas térmicos através de ferramentas de otimização. Um exemplo é a necessidade de obter o custo de aquisição de um equipamento em função de sua capacidade (para trabalhos que avaliam o aspecto econômico). Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) fizeram uso de uma curva que representa o custo do equipamento versus sua capacidade. Embora, não esteja clara a origem desta curva, o custo de aquisição de equipamentos pode ser obtido por um levantamento de preço de um determinado tipo de equipamento em relação a sua capacidade e, então, através de regressão, obtém-se uma curva característica. No presente trabalho os custos de equipamentos presentes em trabalhos recentes foram revisados na seção 2.3. Outro aspecto comum é que a configuração final foi escolhida para se obter menor custo anual capaz de suprir às demandas, obedecendo às restrições do modelo. Em sistemas térmicos, as restrições de modelo são as leis da Termodinâmica, conservação de massa, capacidades máxima e mínima de equipamentos, e comportamento em cargas parciais.

Figura 3 – Método de projeto utilizado por Yokoyama; Hasegawa; Ito (2002)



Fonte: alterado de Yokoyama; Hasegawa; Ito (2002)

Como qualquer problema combinatório, à medida que se aumenta o número de combinações possíveis, aumenta-se também a complexidade (similarmente ao problema da mochila). Existem algumas técnicas usadas para se evitar um esforço computacional exagerado. Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) fizeram uso de uma técnica de decomposição do problema MILP apresentado para tornar possível o cálculo computacional, encontrando uma solução sub-ótima. Este trabalho, contudo, apresentará uma técnica que faz uso de sistemas heurísticos com objetivo de reduzir a complexidade de projetos de sistemas térmicos que serão explanados no capítulo 3.

Um método muito similar ao usado em Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) é apresentado em Fuentes-Cortés et al. (2015). Os autores propuseram uma superestrutura e, a partir de um algoritmo de otimização (programação não-linear inteira mista - MINLP), obtiveram a estrutura final do sistema. O problema apresentado consiste da escolha de configuração ótima de um sistema de cogeração, dimensionamento e escolha de um acionador principal, dimensionamento de um sistema de armazenamento de energia e dimensionamento de sistemas térmicos auxiliares para um complexo residencial. Porém, enquanto o projeto do sistema de cogeração em Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) tinha somente um viés econômico, como objetivo de reduzir custos (mono-objetivo), em Fuentes-Cortés et al. (2015), o projeto tem viés econômico e ambiental, apresentando duas funções-objetivo (multiobjetivo): uma para minimizar custo e outra para minimizar emissão de gases poluentes.

Para Fuentes-Cortés et al. (2015) o custo de capital dos equipamentos pode ser calculado

por Equação (3).

$$CostCap^i = k_f(FC^i \cdot y^i + VC^i \cdot [G^{max-i}]^{\beta^i}) \quad (3)$$

Em todos os termos da equação 3 em que aparece, o sobrescrito i representa qual equipamento está sendo referido (por exemplo, se o equipamento referido é um boiler, $i = B$); y^i é a variável binária que define a existência ou não do equipamento i ; k_f é o fator de anualização dos custos; FC^i é o custo fixo; VC^i é o custo variável; G^{max-i} é a máxima capacidade; e β^i o fator de economia de escala.

Comparando-se os dois trabalhos anteriormente mencionados, Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) e Fuentes-Cortés et al. (2015), pode-se perceber que embora ambos pretendam atender demandas no setor residencial, diferentes autores podem levar em consideração diferentes aspectos de projeto. Por exemplo, o custo de operação e manutenção dos equipamentos é considerado no trabalho de Fuentes-Cortés et al. (2015), mas não é considerado no trabalho de Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002). Outro aspecto importante é que, embora similares, o equacionamento de restrições pode ser diferente, assim como aspectos de projeto e modelamento de custos. Neste sentido, é interessante notar que diferentes autores (projetistas) propõem diferentes superestruturas, com diferentes tecnologias possíveis, mesmo que busquem atender uma mesma aplicação. Essa discussão sobre diferentes soluções de problemas é retomada na seção 2.4.2 e é um dos principais aspectos do presente trabalho.

Ao projetar um sistema térmico de cogeração de grande porte em um aeroporto na China, Zhu et al. (2017) também propõem uma superestrutura adequada para sistemas de cogeração de grande porte. Posteriormente, definem, de modo simultâneo, os componentes e respectivas quantidades e capacidades na configuração final através de métodos de otimização como o MINLP. Zhu et al. (2017) fazem primeiramente o projeto (mono-objetivo) do sistema de cogeração com uma única função-objetivo de minimizar custos. Posteriormente, fazem a o projeto (multiobjetivo) do sistema com duas funções-objetivo (minimizar custos e minimizar emissão de gases poluentes), sendo possível observar que os métodos levam a diferentes configurações finais do sistema.

Os trabalhos de Zhu et al. (2017) e Fuentes-Cortés et al. (2015) são exemplos de projetos reais que apresentam mais de um objetivo, sendo eles ainda contraditórios entre si. Como há mais de um objetivo nestes trabalhos, há também mais de uma solução ótima, onde a solução que apresenta a menor emissão de gases poluentes, apresenta também maior custo, e vice-versa,

sendo necessário a escolha de uma solução que melhor balanceie os aspectos ambiental e econômico de projeto.

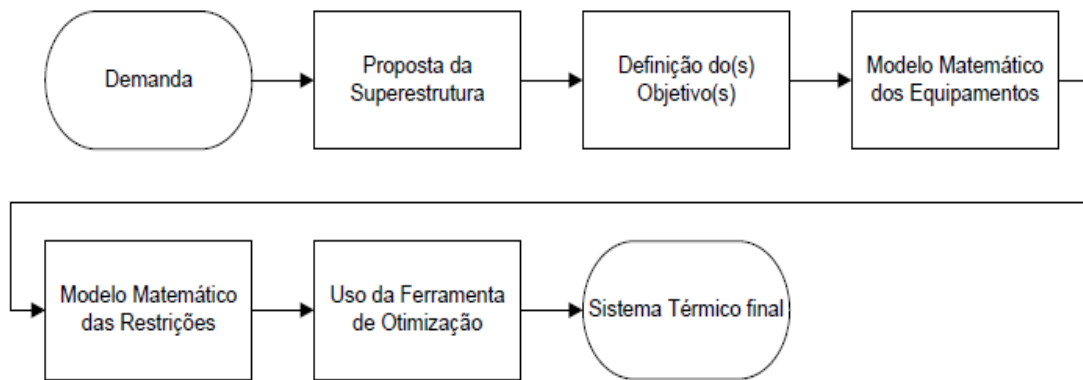
Zhu et al. (2017) consideram mais fatores, quando comparado a Yokoyama, Hasegawa e Ito (2002) e Fuentes-Cortés et al. (2015), tais como: variação da demanda energética no tempo (demandas de dias típicos das quatro estações em função das 24 horas diárias), preço da energia elétrica em função do tempo de uso, preço de acionar equipamentos, variação de temperatura do ambiente e emissão de gás carbônico do sistema de cogeração e da provedora de energia elétrica (considerada como queima de carvão).

Um projeto de sistema de cogeração no âmbito industrial pode ser visto em Balestieri (1994). De maneira similar aos trabalhos feitos no setor residencial anteriormente citados, primeiramente uma superestrutura é proposta e então através de ferramentas de otimização, a configuração final do sistema térmico de cogeração é definida. Com uma abordagem multiobjetiva, tendo como critérios: a irreversibilidade total da central de cogeração (2ª lei da Termodinâmica), emissão de poluentes, a confiabilidade dos equipamentos e máximo benefício econômico, o autor faz uso de três ferramentas de otimização: o uso de grafos-generalizados, programação inteira mista e programação multiobjetiva interativa. Tal método foi utilizado num estudo de caso de uma planta química no setor de papel e celulose.

Uma semelhança notável nesses trabalhos é o método geral utilizado para se projetar sistemas térmicos, exibido na Figura 4. Na etapa inicial de projeto, os autores usam de seu conhecimento para propor uma configuração inicial, composta de todos equipamentos capazes e necessários para suprir a demanda (chamada de superestrutura) e, então, através de ferramentas matemáticas de otimização, obter a configuração final de projeto de um sistema térmico.

Nem todos os autores mencionados explicam o porquê da superestrutura escolhida, mas pode-se imaginar que diferentes especialistas em projeto de sistemas térmicos, com experiências profissionais e conhecimentos teóricos diferentes, provavelmente escolheriam superestruturas diferentes, levando a resultados finais variados.

Figura 4 – Método de projeto de sistemas térmicos através de ferramentas de otimização



Fonte: Produção do próprio autor.

A otimização de estratégias de operação, ainda na etapa de projeto dos sistemas de cogeração, pode ser benéfico para melhor desempenho do sistema (GU et al., 2014). Alguns métodos para dimensionar e otimizar sistemas térmicos podem ser vistos em Ondeck, Edgar Baldea (2017).

2.4.2 Inteligência artificial

Nos anos de 1997, um sistema especialista chamado COLOMBO foi apresentado para auxiliar o projeto de sistemas térmicos (MELLI; SCIUBBA, 1997). Embora este sistema especialista fosse limitado a propor apenas algumas soluções de sistemas térmicos convencionais, a ferramenta se mostrou efetiva no que tange auxiliar um engenheiro projetista de sistemas térmicos. Hoje, com o desenvolvimento e melhoria de novas tecnologias, ferramentas que fazem uso de inteligência artificial são mais efetivas, sendo também utilizadas em outros setores da indústria, como por exemplo, no novo conceito de “Indústria 4.0” (DIEZ-OLIVAN et al., 2018).

Segundo Feigenbaum (1982² apud GIARRATANO, 1998, p. 1, tradução nossa), “um sistema especialista pode ser definido como um programa de computador inteligente, que usa conhecimento e procedimentos de inferência para resolver problemas, que são suficientemente difíceis para expertise humana”. Outro nome dado a sistemas especialistas é sistemas baseados em conhecimento, pois tais sistemas não se limitam a trabalhar apenas com dados, sendo capazes de manipular também informação e conhecimento. Um elemento importante de

² Edward A. Feigenbaum, “Knowledge Engineering in the 1980s,” Dept. of Computer Science, Stanford University, Stanford, CS, 1982.

sistemas baseados em conhecimento é o motor de inferência. O motor de inferência é responsável por emular o cérebro humano e tirar conclusões a partir de fatos.

Segundo Melli (1997), a etapa de projeto é o momento em que a criatividade e experiência do engenheiro são mais requeridas e, por isso, o uso da inteligência artificial de um sistema especialista pode melhorar a qualidade das soluções propostas. Alguns projetos de sistemas de cogeração se tornam tão complexos, que o número de variáveis e equações inviabilizam a otimização direta de uma determinada função objetivo, seguindo o método exposto no item 2.4.1. Mesmo quando resolvidos com auxílio de softwares, a resolução de tais problemas poderia ser bem complexa e longa, como por exemplo, nos trabalhos de Facci (2018) e Ondeck (2017).

Embora a procura da solução ótima através de sistemas, que fazem uso de conhecimento heurísticos, não assegure que a solução ótima global seja encontrada (WANG et al., 2014); tais métodos se justificam por reduzir a complexidade dos problemas, permitindo encontrar uma solução eficiente.

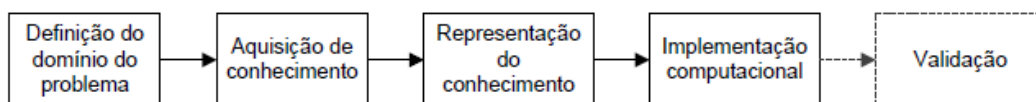
Matelli (2011) faz uso de técnicas de inteligência artificial para automatizar, pelo menos em parte, o projeto de uma central de cogeração a gás natural. O projeto da central de cogeração, se dá através do método de raciocínio baseado em casos (*case-based reasoning*). Nessa abordagem, o programa de inteligência artificial busca, em sua base de casos, soluções já encontradas para problemas similares, previamente resolvidos pelo programa e validadas por especialistas. Com base nessas soluções, o programa sugere uma ou mais soluções para o problema atual, mas com pequenas adaptações a serem validadas por especialistas. Caso as novas soluções sejam validadas, elas passam a integrar a base de casos do programa. Dessa forma, à medida que se faz uso do sistema, aumenta-se a base de casos, que caracteriza a capacidade de aprendizado do programa. Porém, tal método, apresenta como desvantagem a necessidade de que um especialista valide as soluções propostas, além da implementação da base de casos.

Um sistema especialista projetado para auxiliar engenheiros no projeto preliminar de centrais de cogeração a gás natural é exposto em Matelli, Bazzo, da Silva (2009). Os autores deste trabalho, atuando como engenheiros de conhecimento (responsável por abstrair conhecimento do especialista e representá-los em forma de regras, fatos, informações e dados), representaram o conhecimento de especialistas através de regras e de orientação a objetos. É importante notar que, o principal papel dos autores foi representar conhecimento para que o motor de inferência possa manipulá-lo e, assim, emular o raciocínio do especialista. O motor de inferência está contido em uma ferramenta chamada CLIPS, o que elimina, de modo

conveniente, o estudo e/ou a programação da cognição humana.

Com pouquíssimas diferenças, a metodologia de trabalho utilizada por Matelli (2009) também foi utilizada em Matelli (2016) para criação de um sistema especialista que auxiliasse no projeto conceitual de centrais de cogeração baseadas na queima de biomassa. Tal metodologia é sumarizada na Figura 5, sendo considerada uma metodologia consagrada na área de sistemas baseados em conhecimento. Como se pode observar na Figura 5, o desenvolvimento de um sistema especialista, começa com a definição do domínio do problema, que pode ser entendido, em outras palavras, como a definição do escopo de projeto. O próximo passo é a aquisição de conhecimento, que geralmente é obtida na literatura e/ou entrevistas com especialistas na área de domínio desejada, seguido da representação do conhecimento, tipicamente na forma de regras. Dependendo do domínio e da natureza do problema, outras formas de representação de conhecimento podem ser necessárias (como por exemplo, redes semânticas, quadros e orientação a objetos). O último passo é a implementação computacional, em que os engenheiros de conhecimento, a partir do conhecimento representado, fazem a programação da base de conhecimento do sistema especialista, normalmente utilizando ferramentas específicas para esse fim. Embora não apareça em destaque em todos os trabalhos revisados, um passo importante, posterior à implementação computacional, é a validação do sistema desenvolvido, geralmente feita ao simular uma situação em que já se sabe a solução, podendo compará-las com soluções dadas por especialistas.

Figura 5 – Método de desenvolvimento de um sistema especialista



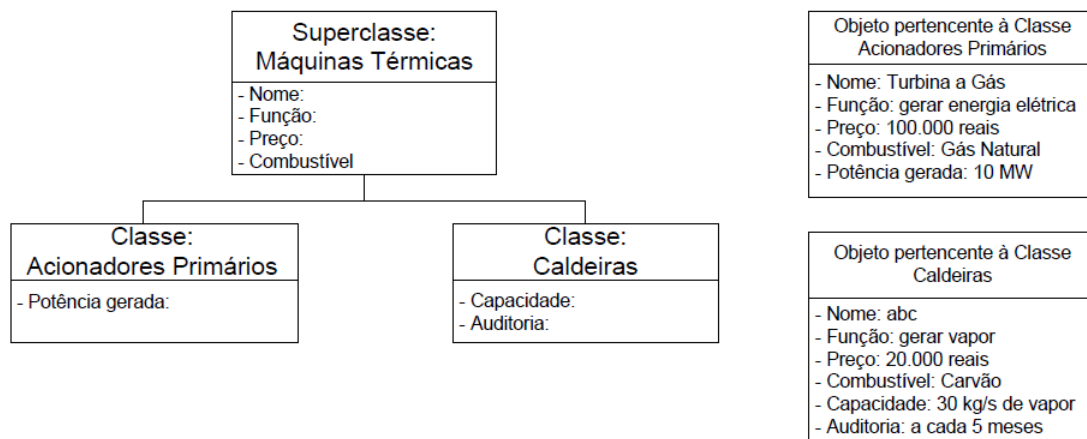
Fonte: Produção do próprio autor.

Outros exemplos deste mesmo método sendo empregado, também podem ser encontrados em outras áreas, como por exemplo, no sistema especialista desenvolvido por Hernandez, Arjona (2008) para auxiliar no projeto de transformadores elétricos e, no desenvolvimento do sistema especialista para auxiliar, no projeto de sistemas hidráulicos apresentado em da Silva; Back (2000).

Para um melhor entendimento, um exemplo de representação de conhecimento com orientação a objetos é exibido na Figura 6. Nota-se que há uma “Superclasse” chamada “Máquinas Térmicas” na qual coexistem duas classes: a classe “Acionadores Primários” e a classe “Caldeiras”. Isso equivale a dizer que todo e qualquer acionador primário é uma máquina

térmica. Semelhantemente, toda e qualquer caldeira é uma máquina térmica. Embora essas duas classes apresentem características (atributos) em comum, como por exemplo: um nome, uma função, um preço e um tipo de combustível, a classe Acionadores Primários se distingue da classe Caldeiras por apresentar um atributo, que é a “Potência gerada”, que não está presente na classe Caldeiras. Similarmente, a classe Caldeiras apresenta dois atributos não presentes na classe Acionadores Primários, sendo estes os atributos: Capacidade e Auditoria. Dois exemplos de objetos foram exibidos, para enfatizar a efetividade e simplicidade de se representar conhecimento com orientação a objetos, pois, desta forma, pode-se facilmente organizar o conhecimento sobre máquinas térmicas.

Figura 6 – Orientação a objetos



Fonte: Produção do próprio autor.

Como mencionado na seção 2.4.1, diferentes autores podem propor diferentes superestruturas, ainda que para uma mesma aplicação. Isso ocorre porque o projeto é baseado em experiências e criatividade do projetista/especialista, fazendo com que diferentes projetistas ofereçam diferentes projetos. Neste sentido, sistemas especialistas, contribuiriam para unificar propostas de superestruturas, pois esses sistemas podem ser desenvolvidos a partir do conhecimento heurístico de diversos especialistas, criando uma base de conhecimento, que representaria o consenso entre eles. Sendo assim, uma superestrutura, gerada por este sistema, reduziria a influência da configuração da superestrutura na busca da solução ótima.

O termo engenharia de conhecimento surgiu para descrever a atividade de programadores, que transformam o conhecimento em regras e códigos em sistemas especialistas (SILVA, 1998). Um trabalho que elucida bem o papel de um engenheiro de conhecimento, pode ser visto em Silva (1998), no qual o autor, atuando como engenheiro do conhecimento, adquire o conhecimento de um especialista em hidráulica e pneumática, por intermédio de entrevistas e

outras técnicas de aquisição. Em seguida, o autor representa e implementa todo este conhecimento num protótipo de um sistema especialista, que auxilia no projeto de sistemas hidráulicos. É interessante notar ainda que, o conhecimento pode ser proveniente de outras fontes, que não diretamente de especialistas, tais como, a literatura, documentos, tabelas e até mesmo ao observar um especialista atuando em sua área de domínio.

2.4.3 Outros métodos de projeto

Há outros métodos que não partem de uma superestrutura previamente estabelecida por conhecimento heurístico. Uma dessas abordagens é a análise exergoeconômica do sistema térmico a ser projetado, como pode ser visto em Yao et al. (2017); Yousefi, Ghodusinejad, Kasaeian (2017). Esse método tem o objetivo de encontrar os parâmetros ótimos, em que a configuração proposta deve funcionar, como, por exemplo, pressão e temperatura de entrada e saída dos equipamentos e máquinas térmicas, para uma máxima eficiência e/ou menor custo. Esse método não garante, porém, que a configuração proposta é a solução ótima para uma dada demanda elétrica e/ou térmica, garante apenas que os parâmetros são ótimos para aquela determinada configuração.

Voll et al. (2013) afirmam que, ao se aplicar o método de se primeiramente propor uma superestrutura e em seguida fazer uso das ferramentas de otimização, corre-se o risco de não considerar a solução ótima, pelo fato de a superestrutura proposta não englobar inicialmente a solução ótima. Como a complexidade de resolução da otimização aumenta exponencialmente com o aumento de equipamentos na superestrutura, os autores propõem um novo método de se automaticamente gerar uma superestrutura e otimizá-la, para o desenvolvimento de um sistema de geração distribuída de energia. De certa forma, pode-se resumir esse novo método nos seguintes passos: primeiramente uma superestrutura é gerada para atender aspectos de projeto, através de uma técnica chamada de geração de estrutura máxima (*maximal structure generation*); caso não haja informações sobre redundâncias de equipamentos, apenas um equipamento de cada é considerado. Em seguida, uma matriz que representa a superestrutura é criada, a qual pode ser usada para incorporar novos equipamentos, caso haja restrições topográficas e redundância de equipamentos. Então se faz uso de ferramentas de otimização, MI(N)LP, obtendo-se uma estrutura final temporária. Em seguida, insere-se um equipamento (em redundância) na superestrutura do passo inicial e faz-se o passo-a-passo novamente, obtendo-se uma nova estrutura final temporária, para ser comparada com a anterior. Caso a última solução gerada seja melhor que a anterior, insere-se novamente um equipamento e

repete-se o processo, até que a solução final não possa ser melhorada.

Há ainda métodos nomeados livres de superestrutura (*superstructure-free*), ou seja, não é necessário a definição de uma superestrutura para processo de projeto (e otimização) do sistema térmico. Voll et al. (2012) propõem um método chamado de “algoritmo evolucionário” (*evolutionary algorithm*), em que um sistema baseado em conhecimento constantemente, propõe soluções e as compara entre si, até que a mais eficiente seja encontrada. Há ainda diversas outras metodologias, que não fazem uso de uma superestrutura e não são aqui citadas, por serem muitas e não fazerem parte do escopo do presente trabalho.

2.5 PARÂMETROS PARA ANÁLISE DE EFICIÊNCIA DE UM SISTEMA DE COGERAÇÃO

Há diversos parâmetros propostos na literatura, podendo até mesmo haver uma dificuldade em comparar o desempenho de diferentes sistemas térmicos, pelo fato de não terem sido avaliados pelo mesmo parâmetro. Análise energética é uma das formas mais comuns de se avaliar sistemas de cogeração, sendo analisado o uso/economia de energia primária, uso de combustível e/ou eficiência energética (CHO; SMITH; MAGO, 2014). A análise energética pode ser usada para comparar diferentes sistemas de cogeração, diferentes estratégias de operação e/ou o sistema de cogeração, com um sistema de referência (geralmente o “sistema separado”) (CHO; SMITH; MAGO, 2014). Neste sentido, um parâmetro apropriado para se avaliar a economia de energia, promovida pela cogeração, é a taxa de economia de combustível (*fuel energy saving ratio*, FESR). Para uma mesma demanda, FESR (equação 4) representa a taxa percentual de economia de combustível do sistema de cogeração, comparada ao consumo de combustível de um sistema de geração separada. O sistema de geração separada é considerado como um ciclo a gás gerando energia elétrica, uma caldeira gerando calor e um sistema de refrigeração elétrico (LI et al., 2006).

$$FESR = \frac{F_{sep} - F_{CCHP}}{F_{sep}} (\%) \quad (4)$$

na qual:

F_{sep} é o consumo de combustível do sistema de geração separada,

F_{CCHP} é o consumo de combustível do sistema de cogeração.

Os valores de F_{sep} e F_{CCHP} podem ser calculados em termos de potência térmica do

combustível (kJ/s) ou em termos de vazão mássica (kg/s) de combustível. Embora resultem no mesmo valor, a definição desse parâmetro se confunde com a de outros, como por exemplo, taxa de economia de energia (*energy saving ratio*) ou taxa de economia de energia primária (*primary energy saving ratio*). Embora apresentem a mesma definição, são definidos exclusivamente em termos energéticos.

Ainda tendo em vista a análise energética citada por Cho (2014), outro parâmetro usado é a taxa de uso de energia primária (*primary energy ratio*). Embora este parâmetro também seja definido por alguns autores como eficiência de primeira lei da Termodinâmica, o termo PER é mais apropriado para avaliar o desempenho de sistemas de cogeração. A razão para tal, é que a eficiência traz em si um limite superior igual a 100%. Por outro lado, em cogeração com refrigeração, valores de PER maiores que 100% podem ser encontrados pelo fato do calor transferido pelo subsistema de cogeração, não estar contido no combustível (MATELLI; BAZZO, 2013). Considerando uma central de cogeração, que gere eletricidade (W), calor (Q_h) e energia de resfriamento (Q_l), a análise energética através de PER é representada pela equação 5, sendo Q_f a energia do combustível consumida pela central.

$$PER = \frac{W + Q_h + Q_l}{Q_f} (\%) \quad (5)$$

Também pode-se avaliar o sistema a partir de análise exergética. Tal análise provê uma medida não apenas da energia usada no sistema, mas também uma medida da qualidade da energia fornecida e consumida e a quantidade de “disponibilidade” destruída no sistema (CHO; SMITH; MAGO, 2014). A análise exergética pode oferecer uma análise da influência de um dado componente, ou subsistema, do sistema sobre a destruição de exergia do sistema como um todo (CHO; SMITH; MAGO, 2014). Sistemas de geração de vapor e potência (CHP) tendem a ter vantagens quanto a eficiência exergética, quando comparados com sistemas, que geram separadamente vapor, energia de resfriamento e potência (CHO; SMITH; MAGO, 2014). A eficiência exergética (ou eficiência de segunda lei da Termodinâmica) é representada pela equação 6, sendo $\dot{E}_{P,tot}$ e $\dot{E}_{F,tot}$, a exergia produzida e a exergia consumida pelo sistema, respectivamente.

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{E}_{P,tot}}{\dot{E}_{F,tot}} (\%) \quad (6)$$

Um parâmetro utilizado para avaliar o ganho econômico do uso de um sistema de cogeração, com definição muito similar a FESR, é a “taxa de economia de custos” (cost saving ratio, CSR). Este parâmetro é a porcentagem da economia do sistema de cogeração, quando comparado ao sistema de geração separada, em relação ao custo do sistema de geração separada (JIANG et al., 2018). A equação 7 representa o parâmetro CSR.

$$CSR = \frac{C_{sep} - C_{CCHP}}{C_{sep}} (\%) \quad (7)$$

na qual:

C_{sep} é o custo do funcionamento e implementação do sistema de geração separada,

C_{CCHP} é o custo do funcionamento e implementação do sistema de cogeração.

3 MATERIAL E MÉTODO

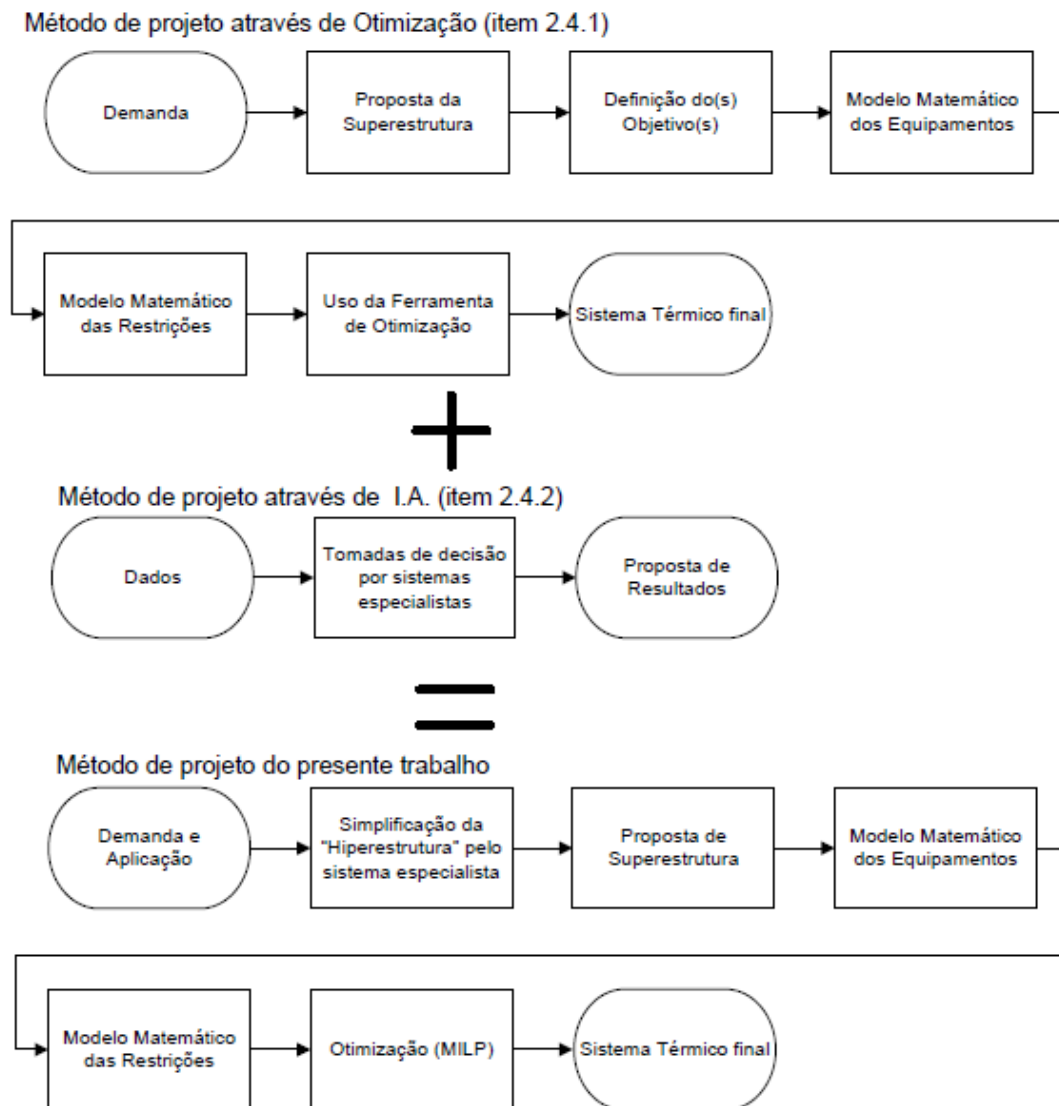
O conceito principal deste trabalho é a união dos métodos de projeto de sistemas térmicos dos itens 2.4.1 e 2.4.2, ou seja, desenvolveu-se um método, que faz uso primeiramente de inteligência artificial e posteriormente de ferramentas de otimização, para o desenvolvimento de um sistema térmico.

Como anteriormente exposto, o uso de ferramentas de otimização é limitado no que tange à resolução de problemas combinatórios muito complexos, enquanto ferramentas que fazem uso de sistema heurístico (I.A.) correm o risco de desprezar a solução ótima. Com isso, o método proposto une os prós das duas ferramentas: a simplificação de projeto, proveniente de conhecimento heurístico, e a busca do ponto ótimo, proveniente das ferramentas matemáticas de otimização. A comparação entre os métodos propostos nos itens 2.4.1 e 2.4.2, com o método proposto neste trabalho, pode ser vista na Figura 7.

Como se pode notar na Figura 7, para o método proposto neste trabalho, faz-se uso de conhecimento heurístico, para propor a superestrutura, que melhor se aplica a uma demanda e aplicação. A partir deste ponto, encontra-se a solução matematicamente ótima (método exposto no item 2.4.1). Analogamente às ferramentas de otimização, partem de uma superestrutura para chegar ao sistema térmico final, foi definida uma “hiperestrutura”, a partir da qual o sistema especialista faz simplificações, removendo alguns componentes, encontrando a “superestrutura” adequada para aquela demanda e aplicação. O conceito e a nomenclatura de “hiperestrutura” foi proposta a partir do conceito de superestrutura. Assim como a superestrutura pode ser definida como um sistema térmico, contendo todas as tecnologias capazes e necessárias para suprir uma demanda e que, a partir da qual, encontra-se o sistema térmico final, a hiperestrutura pode ser definida como o sistema térmico (grande e complexo) que contém todas as máquinas e equipamentos térmicos possíveis e necessários de uma superestrutura para uma dada aplicação, a partir da qual obtém-se a superestrutura.

A sequência de projeto, partindo da hiperestrutura, passando pela superestrutura e chegando à configuração final de projeto, pode ser vista na Figura 8. Um sistema especialista analisa, para que tipo de aplicação o sistema a ser projetado será usado, bem como também, as demandas a serem supridas e, seleciona quais equipamentos que vão deixar de compor a hiperestrutura, resultando numa proposta de superestrutura. É importante notar que o sistema especialista faz a seleção baseada em conhecimento heurístico, ou seja, o sistema especialista simula a tomada de decisões de um especialista em projeto de sistema térmicos, baseada no conhecimento do especialista, que foram traduzidos em regras conforme o item 2.4.2.

Figura 7 – Proposta metodológica de projeto de sistemas térmicos deste projeto



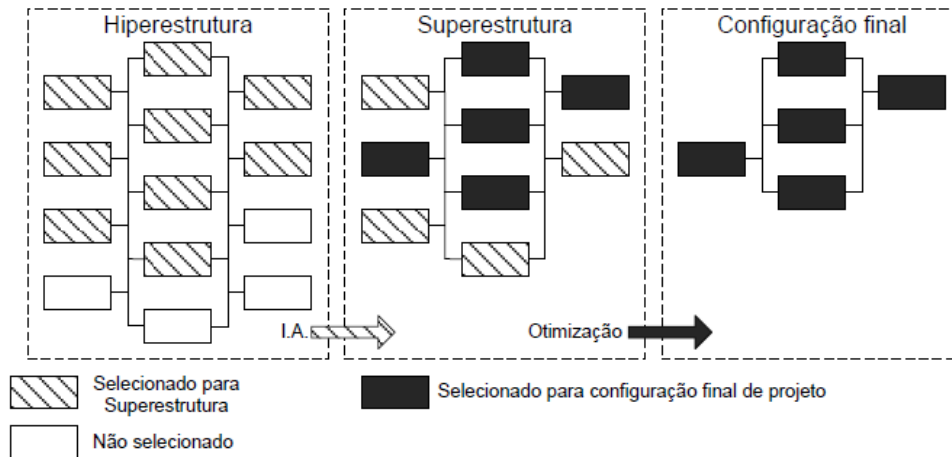
Fonte: Produção do próprio autor.

O sistema especialista propõe uma superestrutura de forma a diminuir o esforço computacional da etapa de otimização, porém sem excluir a possibilidade de se encontrar a configuração ótima. Um bom exemplo dessa afirmação, se dá para o caso em que há apenas demandas de vapor para processos industriais. Nesse caso, nenhum equipamento que tem como finalidade gerar potência elétrica é selecionado para compor a superestrutura. Assim sendo, a possibilidade de se encontrar a solução ótima, não foi excluída antes mesmo de se começar o processo de otimização.

A hiperestrutura proposta foi baseada em configurações sugeridas em diferentes sistemas térmicos propostos em trabalhos existentes na literatura (BALESTIERI, 1994; MATELLI; BAZZO; DA SILVA, 2011; ZHU et al., 2017), cujos sistemas térmicos foram rearranjados de

forma a formar a hiperestrutura, além de sugestões de especialistas na área de projeto de sistemas térmicos.

Figura 8 – Projeto a partir da hiperestrutura

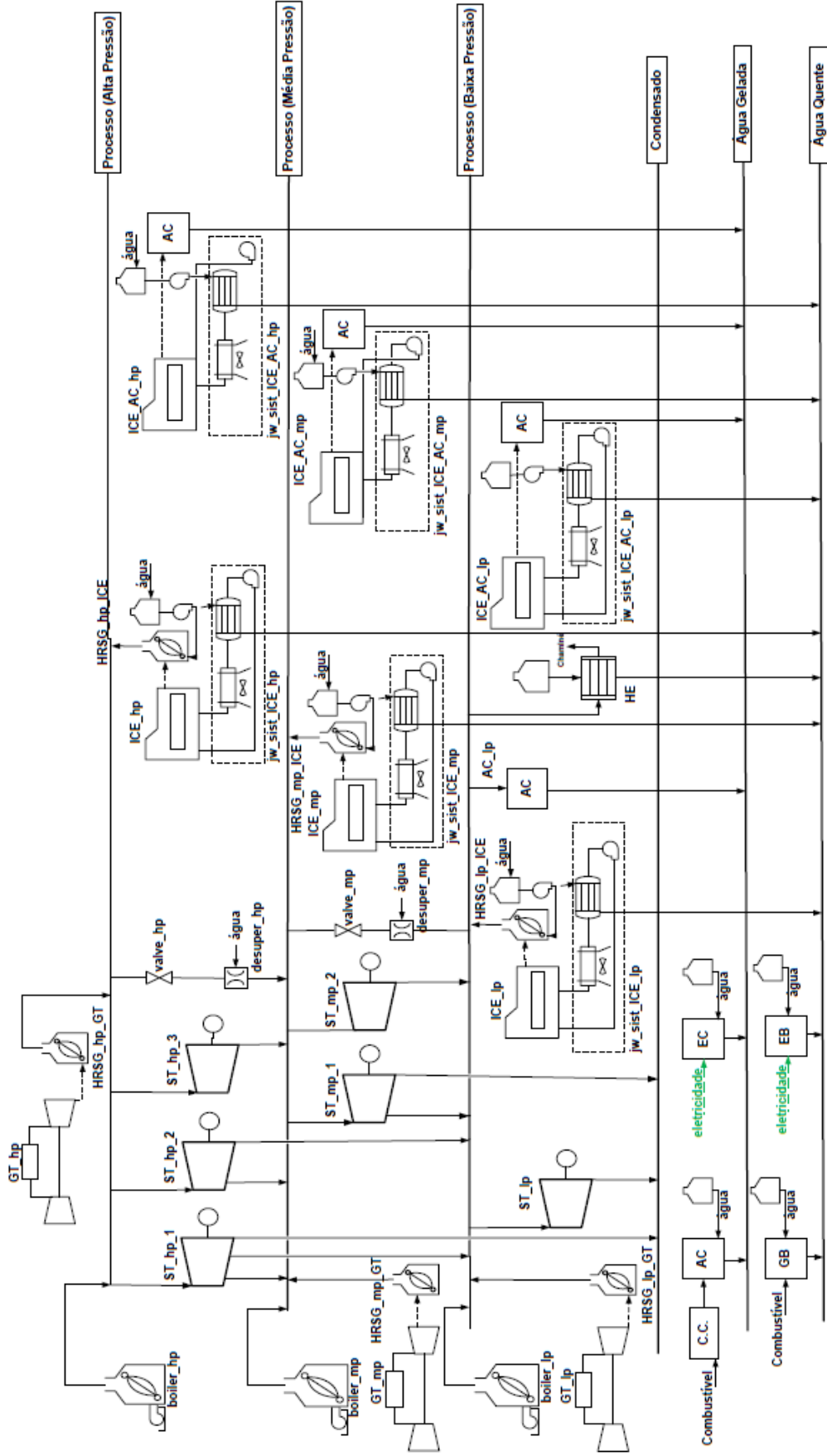


Fonte: Produção do próprio autor.

Desejando-se construir primeiramente um protótipo, a hiperestrutura resultante foi idealizada para atender todo tipo de demanda térmica (de vapor) e elétrica no âmbito residencial, comercial e industrial encontra-se exposta na Figura 9. Como se pode ver, a hiperestrutura é capaz de gerar vapor em três níveis de pressão (alta, média e baixa). Para cada nível de pressão há uma turbina a gás conectada a uma caldeira de recuperação, caldeiras, aquecedores de água, pelo menos uma turbina a vapor, um motor a combustão interna dedicado a uma caldeira de recuperação, com objetivo de gerar vapor para as linhas de pressão e um motor de combustão interna, que também é dedicado a uma caldeira de recuperação (omitida do desenho por motivos de clareza do mesmo), porém, com vapor gerado inteiramente direcionado a um sistema de refrigeração por absorção que gera água gelada, caso haja necessidade, além de válvulas de expansão, dessuperaquecedores, trocadores de calor e sistemas de refrigeração elétrico e a gás. A recuperação de calor da água de jaqueta é possível para ambos os motores, gerando água quente quando necessário. Válvulas de expansão, conectadas a dessuperaquecedores, também podem gerar vapor de média e baixa pressão, a partir das linhas de vapor de alta e média pressão, respectivamente.

Água gelada pode ser produzida por mais três sistemas de refrigeração alternativos ao acionado pelos gases de exaustão dos motores de combustão interna: sistema de refrigeração acionado por câmara de combustão, por eletricidade ou pelo vapor proveniente da linha de baixa pressão.

Figura 9 - Hiperestrutura



Fonte: autoria própria

Já a água quente pode provir de um aquecedor de água a gás, aquecedor de água elétrico ou de um trocador de calor, que absorve calor do vapor da linha de baixa pressão, além do aproveitamento do calor proveniente da água da jaqueta dos motores de combustão interna.

3.1 SISTEMA ESPECIALISTA

O desenvolvimento do sistema especialista, para geração automática de superestruturas, para posterior otimização, foi feito com base no método exposto na Figura 5, e seguiu o passo-a-passo exposto abaixo:

- **Definição do domínio do problema:** projeto de sistemas térmicos de cogeração, que envolve conhecimento de Termodinâmica, transferência de calor, máquinas térmicas e de fluxo;

- **Aquisição de conhecimento:** entrevistas regulares foram realizadas com especialistas na área de projeto de sistemas térmicos, além da aquisição de conhecimento através da literatura;

- **Representação do conhecimento:** o conhecimento dos especialistas foi representado em forma de regras e orientação a objetos;

- **Implementação computacional:** escolheu-se o *shell* CLIPS, desenvolvido pela NASA, que apresenta em si um motor de inferência, para transformar o conhecimento adquirido numa linguagem computacional;

- **Validação:** Uma pré-validação foi feita ao se projetar sistemas térmicos finais, através de otimização direta da hiperestrutura. Isso, porém, foi possível apenas em projetos simples, que envolviam sistemas de equações não muito complexos a serem resolvidos pelo software de otimização, LINGO 10. Ao se comparar tais resultados, com resultados provenientes do projeto de sistemas térmicos, através do método proposto neste trabalho (com uso de inteligência artificial), pôde-se verificar se os resultados finais foram os mesmos, em outras palavras, partindo das mesmas premissas de projeto, verifica-se que o sistema especialista simplifica o cálculo do sistema térmico final, porém sem eliminar a solução ótima. Uma validação mais formal deve ser feita à medida que, especialistas façam uso do sistema especialista e comprovem que os resultados entregues, estão de acordo com conhecimento heurístico obtido por eles ao longo de suas carreiras profissionais.

É importante lembrar que a função do sistema especialista é unicamente para eliminar equipamentos, que baseados na dos especialistas experiência, saiba-se de antemão, não vão compor a solução final, facilitando a etapa de otimização.

A “forma de pensar” dos especialistas foi transformada em regras. As regras escritas no programa são acionadas, caso suas premissas sejam satisfeitas. Para um melhor entendimento, uma das regras existentes no sistema é apresentada na Figura 10. Como se pode notar na Figura 10, regras podem ser entendidas como uma função “SE, ENTÃO”, que neste caso, pode ser entendida como “SE” demanda elétrica maior que 100 MW, “ENTÃO” os motores de combustão interna não devem compor a superestrutura.

O conhecimento de máquinas térmicas foi representado por orientação a objetos, como exposto na Figura 11. Pode-se notar na Figura 11, que todas as máquinas são pertencentes à superclasse “HIPERESTRUTURA”, e as máquinas que são objetivadas a gerar potência pertencem à classe “MAQ_POTÊNCIA” e as objetivadas a gerar vapor, “MAQ_VAPOR”. Em seguida, essas classes foram divididas em três subclasses, em razão do nível de pressão em que trabalham. Todos equipamentos da hiperestrutura foram definidos como uma das 6 subclasses, herdando automaticamente alguns atributos das classes e da superclasse.

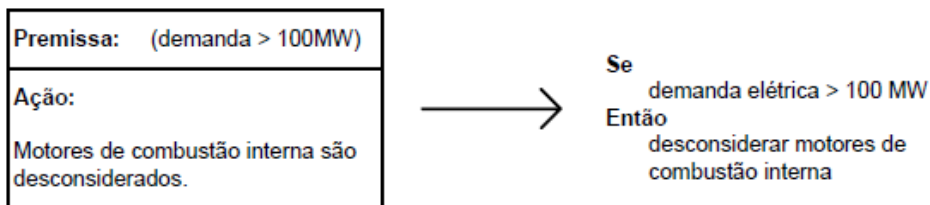
Os atributos que representam um objeto pertencente a qualquer uma dessas subclasses são 6, a saber: “nome”, “status”, “nível de pressão”, “aplicação” e “dedicação”. O atributo “nome” tem como objetivo identificar o objeto. O atributo “status” pode variar entre “existente” e “não existente”, ou seja, caso ele assuma o valor de “não existente” ele deixa de compor a hiperestrutura. Os atributos “nível de pressão” e “aplicação” informam qual nível de pressão tal objeto está associado na hiperestrutura e se sua função é gerar vapor ou potência, respectivamente. O atributo “dedicação” mostra se tal equipamento é dedicado a outro, como por exemplo, ao se observar a Figura 9, pode-se ver que o motor de combustão interna (ICE_lp) é dedicado a uma caldeira de recuperação (HRSG_lp_ICE), e vice-versa. Um exemplo de objeto é exibido na Figura 12. Nesse caso, usou-se como exemplo a representação da turbina a gás associada à linha de alta pressão da hiperestrutura (GT_hp), logo pertencente à subclasse “alta pressão” da classe “MAQ_POTÊNCIA”.

3.2 FERRAMENTA DE OTIMIZAÇÃO

O software utilizado para realizar o procedimento de otimização da superestrutura foi o Lingo 10, cuja licença é disponível no Departamento de Energia da UNESP/Guaratinguetá. O método de otimização utilizado foi o MINLP. O interessante de se escolher este método para otimização é que, como exposto na fundamentação teórica, ele faz uso de uma variável binária, que pode assumir o valor 1 ou 0, sendo o valor 1 equivalente a dizer que o equipamento permanece na estrutura final e o valor 0, o equivalente a dizer que ele é desconsiderado da

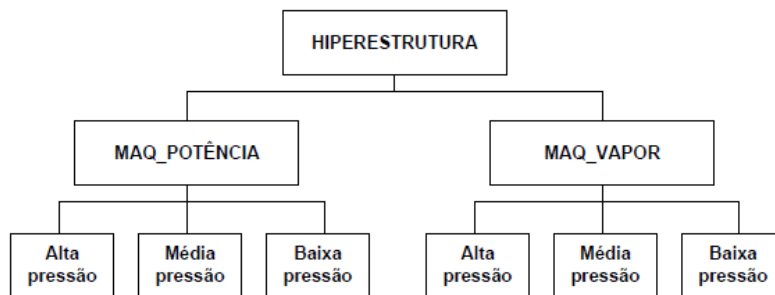
estrutura do sistema térmico final. Porém, essa característica é compatível com o sistema especialista desenvolvido, pois quando o sistema especialista define que o “status” de um equipamento é “não existente”, ele automaticamente diz que a respectiva variável binária deste equipamento é zero, desconsiderando as equações relacionadas a este equipamento na etapa de otimização, reduzindo a complexidade do problema.

Figura 10 – Exemplo de regra usada no sistema especialista



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 11 – Superclasse, classes e subclasses do sistema especialista



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 12 – Objeto – Turbina a gás

Objeto: Turbina a gás de alta pressão	
Atributos:	
Nome:	GT_hp
Nível_pressão:	alta
Status:	existente
Aplicação:	potência
Dedicação:	HRSG_hp_GT

Fonte: Produção do próprio autor.

Então, houve a necessidade de se modelar matematicamente todos os equipamentos da hiperestrutura, seguindo as leis da Termodinâmica de conservação de massa e energia, além das equações de custo de compra dos equipamentos, preço da energia elétrica, combustíveis e etc., sendo essas equações chamadas de restrições do modelo. Para o modelamento é necessário nomear cada equipamento, assim como seus respectivos fluxos de massas, potência de saída ou de entrada, consumo de combustível, todos estes obedecendo às leis de conservação de massa

e de energia. A lista de nomenclatura utilizada se encontra no Apêndice A. A nomenclatura dos equipamentos também pode ser encontrada na Figura 9.

A otimização não visa apenas a definir quais equipamentos da superestrutura permanecem no sistema térmico final, mas também a dizer a quantidade de cada um dos componentes. É importante notar que, ao se definir que haverá mais do que uma unidade de um determinado equipamento, equivale a dizer que dois ou mais, dependendo da quantidade de componentes, deste equipamento estão ligados em paralelo, com as mesmas características (capacidade, conexões de entrada e saída, consumo de combustível, geração ou consumo de potência, etc.).

Definiu-se então uma variável “n”, do tipo inteira positiva, responsável por definir a quantidade de um determinado equipamento (por exemplo, se $n = 5$, há 5 equipamentos ligados em paralelo). Logo, as restrições matemáticas de cada equipamento, presente na hiperestrutura, devem ser multiplicadas tanto pela variável binária “y”, quanto pela variável “n”.

Para um melhor entendimento, o modelo matemático da conservação de energia da caldeira de alta pressão, utilizado no algoritmo de otimização, é exibido na equação 8. Como se pode ver, caso a variável y_{boiler_hp} seja definida como igual a zero, todo o lado esquerdo da equação 8 se torna igual a zero e, conseqüentemente, o vapor gerado por essa caldeira também assume valor zero. Supondo, hipoteticamente, que a equação 8 representa a restrição 3 da Figura 13, quando o sistema especialista define que a caldeira de alta pressão não fará parte da superestrutura ($y_{boiler_hp} = 0$), a restrição 3 desaparece e a região factível assume nova forma, e a região factível da Figura 13 e se transforma na região factível da Figura 14, a partir da qual o algoritmo de otimização procurará a solução ótima.

$$y_{boiler_hp} \cdot n_{boiler_hp} \cdot 0,75 \cdot m_{f_{boiler_hp}} \cdot PCI_{GN} = mv_{boiler_hp} \cdot (h_{hp} - h_0) \quad (8)$$

no qual:

$m_{f_{boiler_hp}}$ é o consumo de combustível da caldeira de alta pressão,

PCI_{GN} é o poder calorífico inferior de gás natural,

mv_{boiler_hp} é a vazão de vapor gerada pela(s) caldeira(s),

h_{hp} é a entalpia da linha de alta pressão (equivalente à entalpia do processo que se deseja suprir),

h_0 é a entalpia da água a temperatura ambiente,

e 0,75 é a eficiência da caldeira.

Logo, caso o sistema especialista previamente defina, por exemplo, a variável binária respectiva à caldeira de alta pressão, como sendo igual a zero ($y_{\text{boiler_hp}} = 0$), não importa o valor que a variável “ $n_{\text{boiler_hp}}$ ” assuma, pois a restrição (equação matemática) desaparece do sistema de equações a ser resolvido pelo software LINGO 10.

Seguindo o mesmo exemplo, caso o sistema especialista defina a variável binária respectiva à caldeira de alta pressão, como sendo igual a 1 ($y_{\text{boiler_hp}} = 1$), isso significa que a caldeira é uma tecnologia que estará presente na superestrutura, mas ao se calcular o sistema térmico final, o software LINGO pode ainda definir a variável binária como sendo zero, ou seja, definindo que a caldeira não fará parte da estrutura final. O inverso não é possível, ou seja, uma vez que o sistema especialista definiu uma variável binária como sendo zero, a ferramenta de otimização não pode mais defini-la como sendo igual a 1 (um).

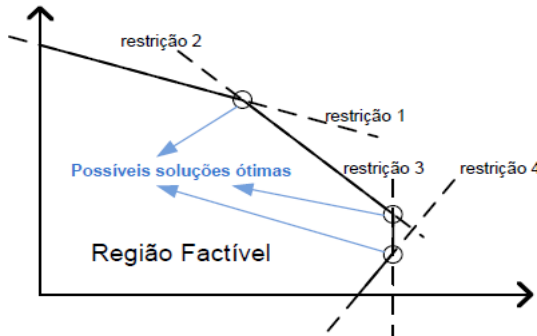
O algoritmo MINLP busca a solução ótima de maximização ou minimização numa região de soluções factíveis (se existente). Matematicamente, isso equivale a dizer que após definidas todas as restrições do problema, as soluções eficientes se encontram na fronteira e a ótima em um dos vértices, como exposto na Figura 13. Logo, o que o algoritmo de otimização faz, é testar as possíveis soluções encontradas na região factível, que é delimitada pelas restrições do problema, encontrando aquela que apresenta o valor máximo ou mínimo da nossa função-objetivo.

O modelo de otimização é sempre mono-objetivo. A função-objetivo considerada no presente trabalho é a minimização de custos anuais de aquisição e funcionamento de um sistema térmico. Para tanto, foram considerados como custos a aquisição de cada componente, o custo do consumo de combustíveis para funcionamento do sistema e uma eventual compra de energia elétrica da rede (caso se mostre economicamente viável). As equações de custo dos equipamentos, com as respectivas referências de onde foram encontradas, estão expostas na Tabela 2. Os equipamentos não citados na Tabela 2 foram considerados com custo de aquisição desprezível. O tempo de vida de projeto foi adotado como sendo de 20 anos. Uma vez que se deseja encontrar a configuração do sistema térmico final, que apresente um menor custo anual, o custo de aquisição deve ser anualizado.

O projeto foi considerado como sendo de paridade térmica, ou seja, as demandas de vapor têm prioridade em ser atendidas, não importando se houver excedente de energia elétrica. Caso o sistema não consiga atender sozinho a demanda elétrica, o restante da eletricidade é comprado da concessionária. Contudo, uma das restrições é que o total de energia elétrica produzida mais a comprada da rede (se aplicável) seja sempre igual ou maior do que a demanda elétrica. Essas premissas são equivalentes a uma empresa autoprodutora de energia, sem venda de excedentes,

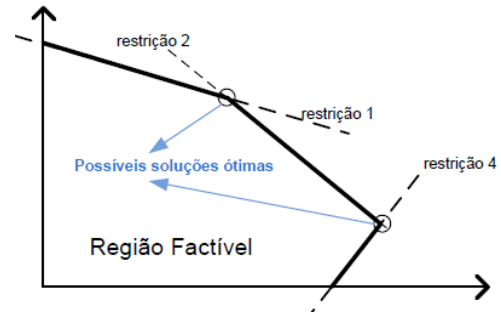
porém que possa obter crédito da concessionária, para meses posteriores, em que haja a necessidade de compra de energia elétrica.

Figura 13 – Região factível



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 14 – Nova região factível



Fonte: Produção do próprio autor.

Tabela 2 – Custos de equipamentos utilizados na otimização

Equipamento	Custo (\$)	Referência
HRSG	$128(W_{HRSG})^*$	(WANG et al., 2018)
Trocadores de calor	$30,9(Q_{trocador})^{**}$	(WANG et al., 2018)
Bomba	$3540(W_{bomba})^{0,71}$ *	(OGORURE et al., 2018)
Turbina a vapor	$6000(W_{ST})^{0,71}$ *	(BEHZADI et al., 2018)
Caldeira	$7497,463(Q_{caldeira})^{0,8833}$ **	(NASERABAD; MEHRPANAHI; AHMADI, 2018)
Sist. de refrig. absorção	$2647(Q_{refrigeração})^{0,66}$ ***	(LIAN; CHUA; CHOU, 2010)
Turbina a gás	$1190(W_{TG})^*$	WANG et al. (2018a)
MCI	$15460.W_{MCI}^{0,7247}$ (€)****	(URBANUCCI; TESTI, 2018)

*W: potência fornecida/consumida (kW);

** Q: calor fornecido/consumido em (kW);

*** $Q_{refrigeração}$: calor consumido em (refrigeration tonnages, ton), sendo 1 ton aprox. 3,516 kW.

**** preço do MCI dado em euros (considerou-se 1€ sendo equivalente a \$0,9).

Fonte: Produção do próprio autor.

3.3 OUTROS ASPECTOS CONSIDERADOS NO PROJETO DE SISTEMAS TÉRMICOS

Uma pesquisa de diversas aplicações de sistemas térmicos de cogeração foi realizada. As principais aplicações encontradas estão na Tabela 3. As aplicações foram divididas em 3 (três) grupos, de forma a unir as aplicações, que apresentem demandas parecidas. Isso facilitou também a criação de regras no sistema especialista, pois as regras se tornaram mais genéricas, valendo para os grupos e, não apenas para uma dada aplicação.

Com o resultado dessa pesquisa, juntamente com o conhecimento dos especialistas, decidiu-se que uma hiperestrutura com 3 (três) linhas de pressão (alta, média e baixa) e uma linha de condensação é capaz de atender todas essas aplicações (além de ser o que é tipicamente encontrado nos sistemas reais já implantados). Definiu-se que a linha de baixa pressão pode variar entre 0,4 a 1,0 MPa, a linha de média, entre 1,0 a 4,0 MPa e a linha de alta, entre 4,0 a 12,0 MPa, abrangendo os valores mínimos e máximos tipicamente encontrados.

Tabela 3 – Aplicações de sistemas térmicos e seus respectivos grupos

Aplicação	
Grupo 1	Lavanderia Industrial
	Laboratórios
	<i>Shopping center</i>
Grupo 2	Aquecimento de residências em cidades
	Condomínios
	Hospital
Grupo 3	Indústria
	Planta de Celulose
	Refinaria

Fonte: Produção do próprio autor.

Neste protótipo inicial, as caldeiras e motores de combustão interna para cada estudo de caso, que serão apresentados na seção 4, foram escolhidos pelos projetistas. Os equipamentos são reais, ou seja, foram escolhidos através de catálogos. O critério para escolha das turbinas a gás e dos motores de combustão interna, foi a possibilidade de conectá-los a uma caldeira de recuperação e, em seguida, a chaminés, onde a temperatura dos gases de exaustão, nas chaminés, fossem maior do que 100°C, evitando a condensação de vapor de água, produto da combustão, na chaminé, e menor do que 200°C, evitando o desperdício de energia térmica para o ambiente. Porém, essas temperaturas de chaminé devem ser alcançadas com sua respectiva diferença de temperatura do ponto de “pinch” (dT_{pp}) estando entre 10°C e 30°C (faixa de valor comumente aceita em projetos de caldeiras de recuperação).

Para cálculo da temperatura de chaminé dos gases de exaustão, após terem passado por uma caldeira de recuperação, utilizou-se da equação 9. O desenvolvimento desta equação se encontra no Apêndice B.

$$Tch = Tg + (Tsat + dTpp - Tg) \cdot \frac{(hv - h_0)}{\eta_{cald}(hv - hl)} \quad (9)$$

no qual:

Tch é a temperatura de chaminé que deve estar entre 100°C e 200°C,

Tg é a temperatura dos gases de exaustão do equipamento anterior à caldeira de recuperação (MCI ou turbina a gás),

$Tsat$ é a temperatura de saturação do líquido à pressão da linha de vapor que se deseja alimentar,

$dTpp$ é o delta da temperatura de pinch-point, que deve estar entre 10° e 30°C,

hv é a entalpia de vapor saturado à pressão da linha de vapor que se deseja alimentar,

hl é a entalpia de líquido saturado à pressão da linha de vapor que se deseja alimentar,

h_0 é a entalpia da água à temperatura e pressão ambientes,

η_{cald} é o rendimento da caldeira.

Após definidos os motores e turbinas a gás, que entraram na superestrutura, para uma dada demanda, o modelo matemático, que descreve os equipamentos, assim como, os valores de vazão de gases, potência gerada ou consumida, consumo de combustível e preço, devem ser inseridos no algoritmo de otimização.

O preço do gás natural foi assumido como sendo aproximadamente 0,40 \$/kg, valor da compra de gás, para sistemas de cogeração da fornecedora COMGAS (2018a), considerando o preço do dólar como sendo aproximadamente R\$ 4,00 e a massa específica do gás natural de 0,766 kg/m³, para uma temperatura de 20°C e pressão de 1atm (COMGAS, 2018b). O preço do Diesel foi considerado como sendo aproximadamente 0,70 \$/kg (PETROBRAS, 2018), considerando a massa específica como sendo 0,831 kg/m³ (VLASSOV, 2001). O poder calorífico inferior do gás natural e do Diesel foram considerados 51295 (kJ/kg) (COMGAS, 2018b) e 42920 (kJ/kg), respectivamente.

O tempo de vida de projeto foi considerado como sendo de 20 anos. Os custos de combustíveis apresentados são anuais, considerando o funcionamento do sistema em 16 horas por dia, 22 dias por mês e 12 meses por ano. Desprezou-se, porém, o regime transiente das máquinas ao ligá-las e desligá-las.

As válvulas de expansão podem expandir no máximo 4 (kg/s) de vapor. A água utilizada, para ajustar a entalpia do vapor incidente nos dessuperaquecedores, é considerada como estando na temperatura e pressão ambientes, assim como, a água que entra nas caldeiras.

Para cada caldeira (de recuperação ou não) há uma bomba associada responsável por

e elevar a pressão da água do fluido. A perda de carga nos equipamentos foi desprezada, logo a potência necessária para elevar a pressão no líquido, através das bombas, foi calculada como sendo a potência necessária para elevar a vazão de vapor necessária, para uma dada caldeira ou entrada de água no dessuperaquecedor, da pressão ambiente até a pressão da linha de vapor, que a mesma(o) está conectada(o).

O preço da compra do kWh em concessionária foi considerado como sendo 0,134 \$/kWh (CAMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA, 2018).

Até três tipos diferentes de motores de combustão interna e turbinas a gás, podem ser escolhidos para funcionar em paralelo em cada nível de pressão. A escolha é feita pelo sistema especialista, que após calcular as temperaturas de chaminé de cada equipamento, através da equação 9, escolhe para cada nível de pressão (se possível) três modelos de MCIs e turbinas a gás, em um banco de dados do sistema especialista, que contém os dados provenientes de catálogo de 52 motores de combustão e 46 turbinas e microturbinas a gás.

Os critérios para esta escolha são os motores e turbinas com maior potência de saída, porém menor que a demanda elétrica; menor potência e maior eficiência. Caso um mesmo modelo seja escolhido por dois ou três destes critérios, não haverá a escolha de mais modelos, e a otimização ocorrerá apenas com os dois ou o único modelo escolhido, para cada linha de pressão.

Isso foi realizado para permitir que o algoritmo de otimização escolha entre vários modelos com baixa potência ou poucos com alta potência e/ou eficiência. Certamente, o ideal seria testar todos os modelos de motores e turbinas a gás do banco de dados, mas como alguns modelos são muito similares e a complexidade da resolução do problema se elevaria muito, decidiu-se por propor três modelos para cada tecnologia. É importante lembrar que o algoritmo de otimização pode decidir pela coexistência (ou não) dos modelos propostos para cada linha de pressão, assim como números variados de cada modelo ligados em paralelo.

Após a escolha dos possíveis modelos de MCI e turbinas a gás, o sistema especialista automaticamente escreve linhas do algoritmo de otimização, inserindo os dados dos mesmos, como por exemplo, consumo de combustível, temperatura dos gases de exaustão, potência, etc., além das equações de conservação de massa e energia e suas respectivas variáveis binária e inteiras positivas.

É admitido que a água da jaqueta do sistema de arrefecimento do MCI tenha uma queda máxima na temperatura de 5°C, de modo a não trincar a camisa do pistão.

Também se admite que a temperatura de saída da água nos sistemas de refrigeração é 6°C, retornando em seguida a 12°C.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção será realizado o projeto de sistemas térmicos para quatro estudos de caso diferentes, que visam abranger sistemas térmicos, que demandam diferentes formas de energia, sendo essas: vapor, água quente, água fria e eletricidade. Para tanto, buscou-se pelo menos uma aplicação de cada um dos grupos apresentados na Tabela 3, com demandas obtidas de instalações reais ou com valores tidos como típicos pelos especialistas em sistemas térmicos.

4.1 ESTUDO DE CASO 1: LAVANDERIA INDUSTRIAL.

Uma lavanderia industrial foi escolhida para o estudo de caso de uma aplicação pertencente ao grupo 1. Os dados das demandas, de uma lavanderia real, foram encontrados em Fernandes (2015). A demanda térmica é 1328 kg/h de vapor a 785 kPa e 170°C, e a demanda elétrica é de 51,9 kW.

Ao informar esses dados, o sistema especialista gera uma lista dos equipamentos da hiperestrutura, que não devem estar na superestrutura, ou seja, uma lista de variáveis binárias de valor zero, referentes a estes equipamentos não selecionados, é gerada. A lista resultante dos equipamentos que **NÃO** devem compor a superestrutura é:

- i) Todos os equipamentos de média ou alta pressão,
- ii) Todos MCIs de alta e média pressão,
- iii) MCIs de baixa pressão (pelo fato de nenhum do banco de dados cumprir os requisitos de escolha),
- iv) Caldeiras de recuperação ligadas aos equipamentos de alta e média pressão,
- v) Caldeiras de recuperação ligadas aos motores de baixa pressão,
- vi) Turbina a vapor de baixa pressão,
- vii) Todos equipamentos destinados a produzir água quente ou gelada.

Com isso, a superestrutura sugerida pelo sistema especialista é a mostrada na Figura 15.

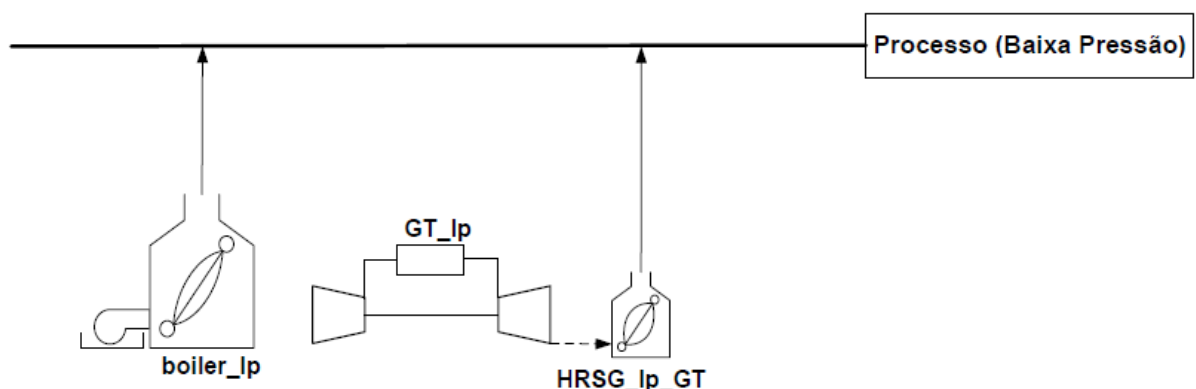
Além disso o sistema especialista definiu que, dentre todas turbinas do banco de dados, apenas a microturbina Capstone - C30LP atende aos requisitos de temperatura de chaminé entre 100°C e 200°C.

Embora a superestrutura resultante seja simples, o processo de otimização deve ainda escolher quais das tecnologias farão parte do sistema térmico final, bem como deve definir se há necessidade de compra de energia da concessionária. As variáveis binárias, representativas do status dos equipamentos desconsiderados na superestrutura, são definidas pelo sistema

especialista automaticamente no modelo de otimização como iguais a zero. Assim, o número de restrições e de variáveis é reduzido expressivamente, com consequente redução do esforço computacional requerido para resolver o modelo.

A otimização resulta em um sistema térmico, para a lavanderia, composto de caldeira de baixa pressão (boiler_lp) e uma bomba para elevar a pressão da água, até a pressão final desejada (785 kPa), que juntas produzem o vapor na vazão e condição termodinâmica requerida e duas microturbinas Capstone C30LP, que atendem à demanda elétrica. Logo, o sistema térmico coincide com a superestrutura mostrada na Figura 15, com exceção da caldeira de recuperação conectada após a microturbina. A energia elétrica gerada pelas duas turbinas tem o valor total de 56 kW (4,1 kW acima da demanda). Mesmo com excedente elétrico, essa configuração apresenta um custo anual total de aquisição e funcionamento de aproximadamente 320,1 mil dólares, enquanto um sistema separado (considerado como sendo composto por uma caldeira para produção de vapor e compra de energia elétrica da concessionária) apresentaria um custo total anual de aproximadamente 322,9 mil dólares. É importante lembrar que esses custos foram calculados para um período de funcionamento de 20 anos, operando 16 horas por dia, 22 dias por mês e 12 meses por ano. O custo anual total, há pouco citado, é composto pelo custo anual da compra das duas microturbinas a gás de \$3.332,0, da compra da caldeira \$148.504,7, da compra de sua respectiva bomba \$66,79 e do custo anual da compra de gás natural, \$168.206,0. O custo da compra da bomba que funciona junto à caldeira é ínfimo.

Figura 15 – Superestrutura para síntese de um sistema térmico de uma lavanderia



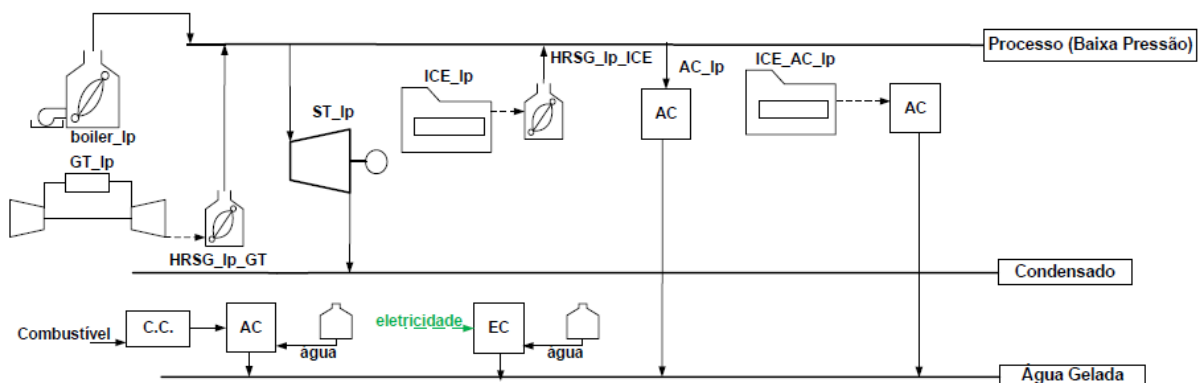
Fonte: Produção do próprio autor.

4.2 ESTUDO DE CASO 2: *SHOPPING CENTER*.

O segundo estudo de caso envolve um shopping center, que apresenta uma demanda de energia elétrica de 6 MW e uma energia de resfriamento de 3100 TR para o ar-condicionado do edifício.

Ao se inserir no sistema especialista tais demandas, o mesmo estabelece a superestrutura exposta na Figura 16. Como se pode notar na Figura 16, a superestrutura apresenta ligados a uma linha de vapor de baixa pressão (assumido como vapor saturado a 1 MPa): uma caldeira convencional; uma turbina a gás; um motor de combustão interna, conectado a uma caldeira de recuperação; além de sistemas de refrigeração por absorção acionados respectivamente por câmara de combustão, por eletricidade, por vapor proveniente da linha de baixa pressão e, por último, outro acionado por um motor a combustão.

Figura 16 – Superestrutura para síntese de sistema térmico de um *shopping center*.

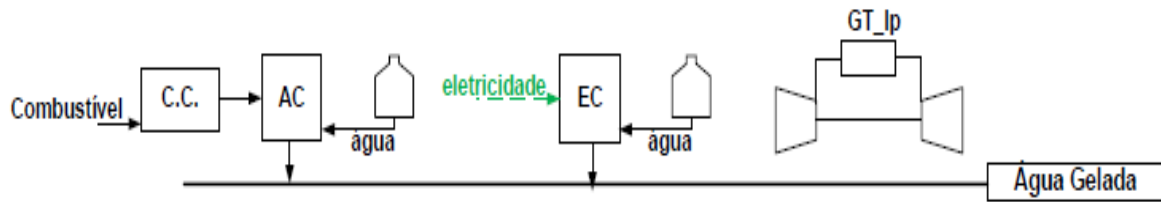


Fonte: Produção do próprio autor.

O sistema especialista ainda especificou que os MCIs (conectados ao sistema e refrigeração e à caldeira de recuperação) podem ser dos modelos W10V31 e W60L20DF do fabricante de motores Wäertsilä. Similarmente, o sistema especialista definiu como possíveis turbinas a gás, os modelos C30LP e C1000HP (microturbinas) do fabricante Capstone.

Após a etapa de otimização, obteve-se como resultado um sistema térmico final composto por 8 microturbinas Capstone - C1000HP, que fornecem 8 MW de energia elétrica, dos quais 6 MW atendem à demanda elétrica e 2 MW são utilizados para acionar o sistema de refrigeração acionado por eletricidade (EC). Porém, tal sistema de refrigeração só gera uma energia de resfriamento de aproximadamente 2844,2 TR, sendo necessário o uso de um sistema de refrigeração por absorção acionado pela queima de gás natural (AC), gerando uma energia de resfriamento de 255,8 TR. O sistema térmico final está exposto na Figura 17.

Figura 17 – Sistema térmico final do *shopping center*.



Fonte: Produção do próprio autor.

O custo anual de compra das microturbinas é de \$476.000,00, da compra dos dois sistemas de refrigeração é \$2.801.223,00. O custo anual da compra de gás natural para o sistema de refrigeração por absorção e para as 8 turbinas é de \$3.017.590,00, resultando num custo total anual de aquisição e funcionamento de \$6.294.813,00.

4.3 ESTUDO DE CASO 3: INDÚSTRIA.

O terceiro estudo de caso envolve uma indústria, que apresenta as seguintes demandas: um processo que demanda 10 kg/s de vapor a 12 MPa e 550°C; um processo que demanda 10 kg/s de vapor a 2 Mpa e um processo que demanda 10 kg/s de vapor a 0,5 MPa. O condensado deve ter uma pressão de 10 kPa, com título de no mínimo 96%. A demanda elétrica é de 100 MW.

Após obter o valor entálpico de cada linha de vapor, através do diagrama de Mollier, os mesmos foram inseridos no sistema especialista, juntamente com os demais dados sobre as demandas térmica e elétrica. O sistema especialista define então a lista de equipamentos, que não devem entrar na superestrutura, resultando na superestrutura exibida na Figura 18.

Embora o sistema especialista proponha três modelos de turbinas a gás, para cada nível de pressão, foram escolhidas apenas as turbinas de maior eficiência, com objetivo de simplificar o modelo matemático a ser resolvido posteriormente pelo LINGO 10. As turbinas então propostas para os níveis de alta, média e baixa pressão são SGT_A05_AE, SGT_A65_TR_DLE_ISI_60Hz (ambas da Siemens) e Capstone C1000HP, respectivamente.

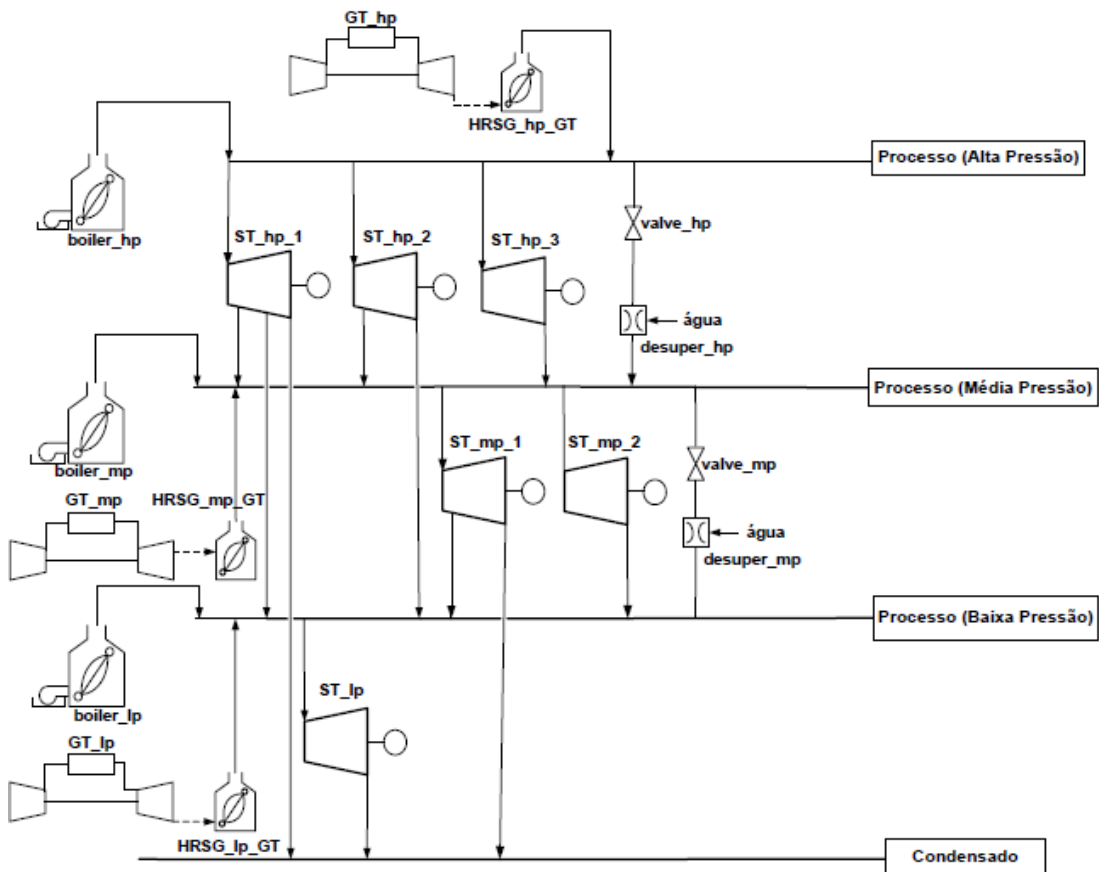
Supondo também restrições, quanto ao espaço disponível para a acomodação dessas turbinas, uma restrição matemática presente no modelo de otimização restringe em dez o número de unidades de cada modelo.

A solução da etapa de otimização, corresponde ao sistema térmico de cogeração ilustrado na Figura 19. O sistema térmico final corresponde a uma turbina SGT_A65_TR_DLE_ISI_60Hz, da fabricante Siemens, que está conectada a uma caldeira de recuperação, que gera vapor para linha de média pressão; dez microturbinas Capstone

C1000HP; uma caldeira conectada à linha de alta pressão e outra ligada à linha de média pressão e, por fim, uma turbina a vapor conectada entre as linhas de média e baixa pressão.

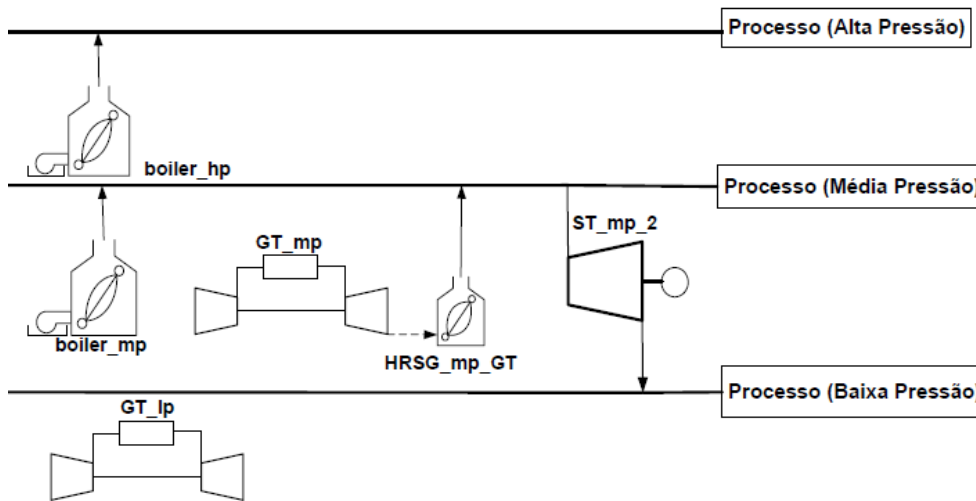
A caldeira de alta pressão produz vapor, única e exclusivamente, para o processo de alta pressão, conforme a demanda. Já a caldeira de média pressão produz, apenas, 7,72 kg/s do vapor da linha de média pressão, enquanto a caldeira de recuperação, após a turbina a gás de média pressão (SGT_A65_TR_DLE_ISI_60Hz, Siemens), produz 12,28 kg/s. Juntas, essas caldeiras, suprem o processo de média pressão (10 kg/s), conforme a demanda, e ainda acionam a turbina a vapor de extração, que tem em sua saída o vapor no estado termodinâmico do processo de baixa pressão, suprimindo o mesmo com a vazão de vapor necessária (10 kg/s).

Figura 18 – Superestrutura gerada para o estudo de caso da indústria



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 19 – Sistema térmico final da indústria



Fonte: Produção do próprio autor.

A turbina a gás de média pressão é responsável por gerar 61.842 kW. As dez microturbinas C1000HP produzem juntas 10.000 kW. A turbina a vapor gera uma potência de 1.800 kW. O restante da energia elétrica é comprado da concessionária, resultando num valor de 26.358 kW.

O custo anual da compra de todas as caldeiras corresponde a \$4.382.526,0. O custo anual do consumo de gás natural é de aproximadamente 29,7 milhões de dólares. O custo anual para compra das turbinas a gás chega a um valor de \$4.274.599,0. Os custos anuais da compra da turbina a vapor e da compra de energia elétrica da concessionária, são respectivamente \$61.427,77 e \$26.358,0.

4.4 ESTUDO DE CASO 4: HOSPITAL UNIVERSITÁRIO.

O quarto estudo de caso envolve um hospital, cujas demandas são: 370 kg/s de vapor saturado a 8 bar; energia de resfriamento equivalente a 120 TR, 1,2 MW de energia elétrica e 60 m³/dia de água quente a 60°C. Inserindo-se esses dados no sistema especialista, obtém-se como superestrutura o sistema térmico exibido na Figura 20. A superestrutura é composta de motores a combustão interna e turbina(s) a gás conectadas às respectivas caldeiras de recuperação, que geram vapor para linha de baixa pressão; caldeira convencional, também conectada à linha de baixa pressão; uma turbina a vapor; sistemas de refrigeração acionados por eletricidade, câmara de combustão, gases de exaustão do MCI e vapor proveniente da linha de baixa pressão; um aquecedor de água, movido a gás natural e outro movido a eletricidade, e,

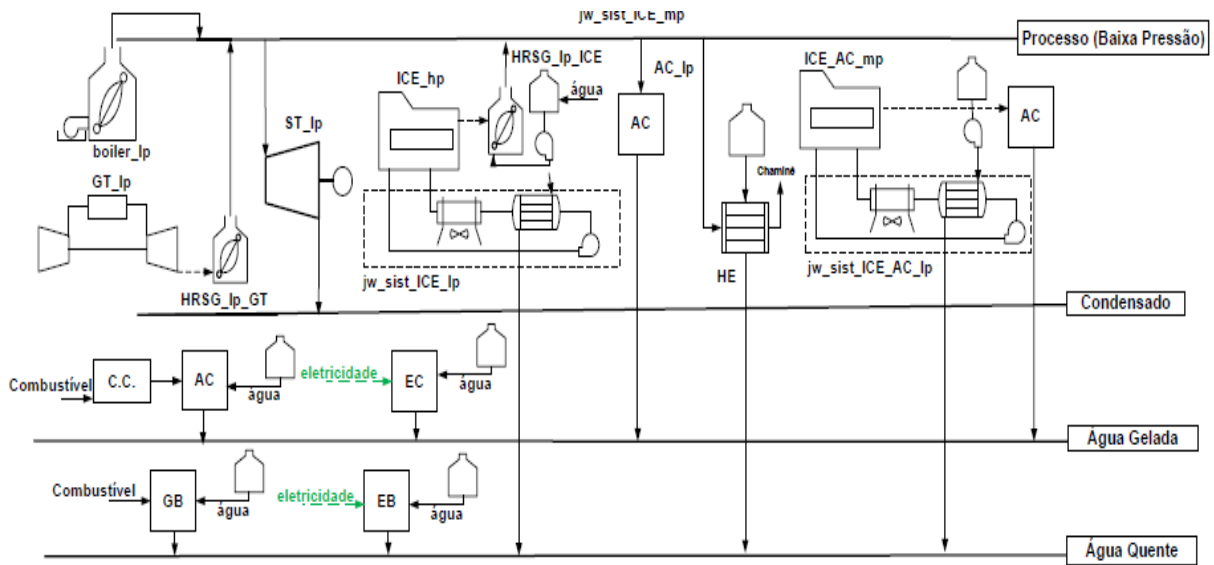
por fim, um trocador de calor que aquece a água a partir do calor proveniente também da linha de baixa pressão.

Após a etapa de otimização, obteve-se o sistema térmico final, exibido na Figura 21. No sistema térmico final, uma caldeira é responsável por produzir todo o vapor necessário. É importante ressaltar que, matematicamente, uma caldeira que produz 370 kg/s terá o mesmo custo de dez caldeiras, que produzam 37 kg/s de vapor cada. Caberia, então, analisar outras questões, tais como espaço disponível, confiabilidade do sistema e etc. A demanda de água quente (60 m³/dia a 60 °C) é toda suprida pelo aquecedor de água movido por eletricidade, enquanto a demanda de água (120 TR) gelada é toda suprida pelo sistema de refrigeração pela queima de gás natural.

Uma microturbina Capstone - C1000HP é responsável por atender parte da demanda elétrica, gerando uma potência elétrica de 1 MW. Com isso, 459,12 kW são comprados da concessionária, para suprir os 200 kW restantes da demanda elétrica e acionar a bomba atrelada à caldeira conectada à linha de baixa pressão, processo esse que exige aproximadamente 459 kW. A demanda de água quente se mostrou pequena, ao ponto de a energia necessária para acionar o sistema de aquecimento de água por energia elétrica ser considerada desprezível. Isso, devido ao fato de não se considerar no projeto termoacumulação, o que poderia aumentar a demanda de água quente em períodos em que o sistema de aquecimento de água está em funcionamento, para armazenar energia para os períodos em que o sistema está desligado, porém a demanda de água quente continua a ser atendida.

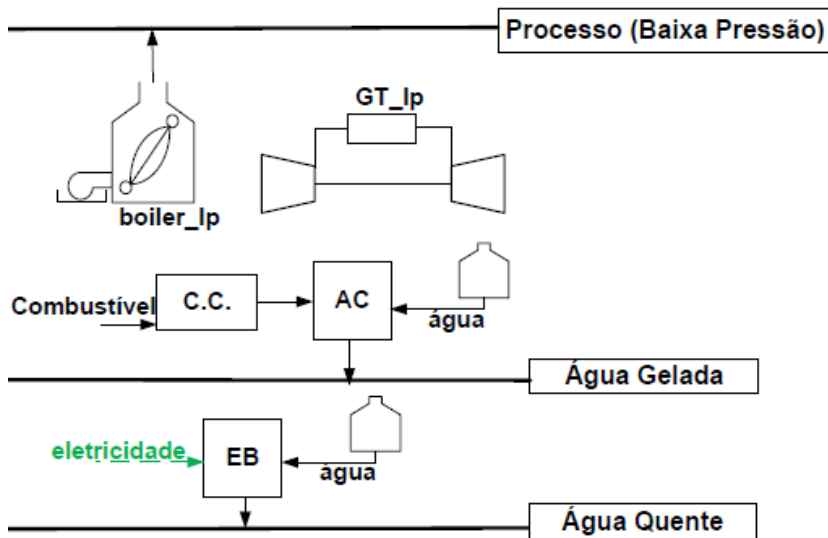
Os custos anuais da aquisição do sistema, compra de combustível e compra de energia elétrica estão exibidos na Tabela 4.

Figura 20 – Superestrutura para o estudo de caso do hospital



Fonte: Produção do próprio autor.

Figura 21 – Sistema térmico final do hospital



Fonte: Produção do próprio autor.

Como se pode notar na Tabela 4, a elevada demanda de vapor faz com que os custos da compra de gás natural sejam também elevados.

Tabela 4 – Custos do sistema térmico do hospital

Item	Custo (\$)
Compra de energia elétrica (459,1 kW)	259.873,8
Compra de gás natural	156,3 milhões
Turbina a gás C1000HP	59.500,0
Caldeira	46,87 milhões
Aquecedor de água	56,2
Sistema de Ref. por absorção	327.573,3
Total (aproximado)	203,8 milhões

Fonte: Produção do próprio autor

4.5 ANÁLISE DOS SISTEMAS DE COGERAÇÃO

Nesta seção será apresentada uma comparação entre os índices de desempenho econômico e termodinâmico dos sistemas de cogeração, propostos nas quatro aplicações de estudo de caso anteriores e, os índices de desempenho de sistemas separados, que atendam as mesmas aplicações.

Os índices de desempenho a serem comparados são o PER, FESR e CSR. É importante notar, porém, que o índice FESR será calculado em base energética.

Para o sistema separado, considerou-se como sendo composto: por uma turbina a gás, para gerar eletricidade; por uma caldeira, para gerar vapor em cada nível de pressão (quando necessário); por um sistema de refrigeração acionado por eletricidade, para gerar água gelada e por um aquecedor de água a gás, para gerar água quente.

Para o sistema separado, porém, considerou-se uma turbina a gás teórica, com eficiência elétrica de 40% (LI et al., 2006), ao invés de se escolher turbinas através do sistema especialista. O COP do sistema de refrigeração, acionado por eletricidade, foi definido como sendo igual a 5 (LI et al., 2006). A caldeira e o aquecedor de água têm como combustível o gás natural.

Embora muitas vezes ínfimo, o custo da compra de bombas atreladas às caldeiras também foi considerado, assim como, a energia necessária para acionar o sistema de refrigeração do sistema separado.

Os índices de desempenho dos sistemas térmicos, propostos nos itens de 4.1 a 4.4 e os respectivos índices de desempenho de sistemas separados, estão expostos na Tabela 5.

Como se pode ver na Tabela 5, a eficiência dos sistemas térmicos de cogeração ficou dentro do esperado. O fator mais importante a ser considerado é o CSR, pois a função objetivo era minimizar custos de aquisição e funcionamento, independente das vantagens e desvantagens técnicas de se obter tal configuração final do sistema. Como se pode notar, o ganho financeiro em relação ao sistema separado de referência só ocorreu de forma considerável no sistema industrial. Isso provavelmente se dá, principalmente, por dois fatores: o primeiro é o fato de as configurações finais apresentadas não se diferenciarem muito de sistemas separados, com exceção da indústria; o segundo fator é que os sistemas térmicos finais, apresentados pelo método proposto no presente trabalho, são baseados em acionadores primários reais, com dados provenientes de catálogos, enquanto o sistema separado é baseado em máquinas teóricas presentes na literatura. Porém, dadas tais considerações, o método se mostrou conciso em oferecer as configurações com menores custos de aquisição e funcionamento.

Tabela 5 – Sistemas térmicos finais vs sistemas separados

	Lavanderia (%)	Shopping (%)	Indústria (%)	Hospital (%)
PER	73,48	66,42	66,45	74,92
FESR	1,85	-48,09	25,87	0
CSR	0,88	-2	5,7	-0,1

Fonte: Produção do próprio autor

Ainda ao se observar a Tabela 5, pode-se notar também, que o uso de energia primária (em sua maioria, combustível) não apresenta um padrão, no que tange a apresentar vantagens e desvantagens em relação ao sistema separado de referência. Fato esse mostrado pelos índices FESR com valores praticamente próximos de zero para os estudos de caso da lavanderia e do hospital, valor positivo alto para o caso da indústria (grande vantagem técnica ambiental) e valor negativo baixo para o caso do hospital (grande desvantagem técnica ambiental). Isso pode ser explicado pelo fato de que a otimização não se preocupa com aspectos técnicos, apenas com custos, fazendo com que as soluções apresentadas tenham aspectos técnicos e ambientais, de certa forma, aleatórios.

Cabe observar, ainda, que nos estudos de caso apresentados, motores de combustão interna não apareceram nos sistemas térmicos finais, o que frequentemente não corresponde à realidade. Isso pode ocorrer pelo fato de o custo de compra das microturbinas ter sido calculado com a equação de custos encontrada na literatura para turbinas a gás, por não se haver

encontrado uma equação de custo mais realista. Logo, as microturbinas se tornaram tecnologias altamente competitivas, quanto à questão econômica, sendo frequentemente escolhida à motores de combustão interna.

Por isso, uma das sugestões de trabalhos futuros, é o uso do método proposto no presente trabalho, inserindo-se no algoritmo de otimização, uma equação de custos de microturbinas, levantada a partir da curva de preço das mesmas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

Buscou-se no presente trabalho a redução na complexidade de projeto de sistemas térmicos, através do desenvolvimento de um sistema especialista. Este trabalho destacou, também, os principais aspectos de projeto de um sistema térmico. Para tanto, se fez necessária uma revisão sobre métodos de projeto, bem como aspectos técnicos dos principais equipamentos utilizados em sistemas térmicos. O conhecimento de especialistas em projetos de sistemas térmicos, informação disponível na literatura e dados técnicos de equipamentos reais foram inseridos no programa de inteligência artificial. Ao se informar o sistema especialista dos dados sobre as demandas a serem supridas pelos sistemas térmicos, uma superestrutura é proposta pelo mesmo. Os dados da superestrutura proposta são automaticamente carregados no software matemático LINGO 10, que realiza uma otimização mono-objetiva de propor o sistema térmico final de menor custo de aquisição e funcionamento. O método proposto, que faz uso de sistema especialista, se mostrou eficiente em reduzir a complexidade de projeto, uma vez que reduziu substancialmente o número de equações a serem resolvidas pelo software matemático de otimização. Outra vantagem aparente é que o conhecimento de mais de um especialista pode ser combinado no programa de inteligência artificial, ou seja, um projetista pode utilizar o sistema especialista, para obter uma superestrutura fundamentada na experiência de diversos profissionais na área, além de poupar tempo de projeto da superestrutura e de posterior cálculo, pelo fato de a superestrutura proposta ser concisa, todavia sem descartar a solução ótima.

5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

No presente trabalho apresentou-se uma hiperestrutura, definida como um sistema térmico com todas as máquinas e equipamentos térmicos possíveis e necessários para se formar uma superestrutura. Muito embora a hiperestrutura proposta nesse trabalho apresente as principais tecnologias utilizadas em sistemas térmicos, mais tecnologias podem ser consideradas em trabalhos futuros, como por exemplo, desaeradores e queimadores suplementares.

O presente trabalho se dedicou apenas a aspectos técnicos, no que tange modelos matemáticos e conhecimento heurístico inserido no sistema especialista. Porém, o sistema

especialista poderia definir a superestrutura, também baseada em aspectos econômicos de mercado, a probabilidade de os preços considerados serem realmente reais, etc.

Futuros trabalhos podem ser feitos também realizando otimizações multiobjetivo, ou seja, levando em consideração aspectos econômicos, técnicos e ambientais. Além de se realizar o levantamento de curvas de preço de microturbinas, para se obter resultados mais realistas.

REFERÊNCIAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução normativa 235**: estabelece os requisitos para a qualificação de centrais termelétricas cogeneradoras de energia e dá outras providências. Brasília, 2006. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren2006235.pdf>>. Acesso em: 10 nov. 2018.
- AL MOUSSAWI, H.; FARDOUN, F.; LOUAHLIA, H. Selection based on differences between cogeneration and trigeneration in various prime mover technologies. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 74, p. 491–511, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117303015>>. Acesso em: 10 set. 2018.
- BALESTIERI, J. A. P. **Planejamento de centrais de co-geração**: uma abordagem multiobjetiva. 1994. 90 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1994.
- BARBOZA, A. O. et al. Programação linear inteira mista e algoritmo genético aplicados ao problema de transferência e estocagem de produtos em uma indústria petrolífera. **Sistemas & Gestão**, v. 10, n. 4, p. 561–574, 2015. Disponível em: <<http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/662/372>>. Acesso em: 19 out. 2018.
- BEHZADI, A. et al. Multi-criteria optimization and comparative performance analysis of a power plant fed by municipal solid waste using a gasifier or digester. **Energy Conversion and Management**, v. 171, n. may, p. 863–878, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.014>>. Acesso em: 01 out. 2018.
- BEJAN, A.; GEORGE, T.; MORAN, M. **Thermal design and optimization**. New York: Wiley, 1996. 542p.
- BRENNNA, M. et al. Challenges in energy systems for the smart-cities of the future. **2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition, ENERGYCON 2012**, p. 755–762, 2012. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/6348251/>>. Acesso em: 26 mar. 2018.
- CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. **Histórico de preços semanais**. Disponível em: <http://?_adf.ctrl-state=q5yylk3hq14&_afLoop=428988641078929#!%2540%2540%253F_afLoop%253D428988641078929%2526_adf.ctrl-state%253Dq5yylk3hq_18%3E>. Acesso em: 02 out. 2018.
- CHO, H.; SMITH, A. D.; MAGO, P. Combined cooling, heating and power: a review of performance improvement and optimization. **Applied Energy**, v. 136, p. 168–185, 2014. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261914009301?via%3Dihub>>. Acesso em: 16. out. 2018.
- COMGAS. **Tarifas do gás natural canalizado**: cogeração. Apresenta preços do gás natural fixo e variável em função do volume da demanda. Disponível em: <<https://www.comgas.com.br/tarifas/cogeracao/>>. Acesso em: 21 nov. 2018a.

COMGAS. **Características do gás natural**. Características técnicas do gás natural quando utilizado como combustível em indústrias. Disponível em: < <https://www.comgas.com.br/para-industria/caracteristicas-do-gas-natural/>>. Acesso em: 21 nov. 2018b.

DIEZ-OLIVAN, A. et al. Data fusion and machine learning for industrial prognosis: trends and perspectives towards industry 4.0. **Information Fusion**, v. 50, p. 92–111, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1566253518304706>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

FACCI, A. L.; UBERTINI, S. Meta-heuristic optimization for a high-detail smart management of complex energy systems. **Energy Conversion and Management**, v. 160, p. 341–353, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890418300359>>. Acesso em: 19 out. 2018.

FERNANDES, G. D. **Estudo da viabilidade de implantação de um sistema de cogeração de energia em uma lavanderia industrial**. Rio de Janeiro: UFRJ / Escola Politécnica, 2015. Disponível em: <<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10014774.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2018.

FUENTES-CORTÉS, L. F. et al. Optimal design of CHP systems for housing complexes involving weather and electric market variations. **Applied Thermal Engineering**, v. 99, p. 252–263, 2015. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890415003908>>. Acesso em: 14 out. 2018.

GIARRATANO, J. C. **Expert systems: principles and programming**. 3. ed. Boston: PWS, 1998. 597 p.

GU, W. et al. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: a review. **International Journal of Electrical Power and Energy Systems**, v. 54, p. 26–37, 2014b. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ijepes.2013.06.028>>. Acesso em: 15 out. 2018.

HERNANDEZ, C.; ARJONA, M. A. An intelligent assistant for designing distribution transformers. **Expert Systems with Applications**, v. 34, p. 1931–1937, 2008. Disponível em: < <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S095741740700070X> >. Acesso em: 06 nov. 2018.

ISA, N. M.; TAN, C. W.; YATIM, A. H. M. A comprehensive review of cogeneration system in a microgrid: a perspective from architecture and operating system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 81, p. 2236–2263, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1364032117309747>>. Acesso em: 08 out. 2018.

JIANG, R. et al. Multi-objective assessment, optimization and application of a grid-connected combined cooling, heating and power system with compressed air energy storage and hybrid refrigeration. **Energy Conversion and Management**, v. 174, p. 453–464, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890418309129>>. Acesso em: 10 set. 2018.

LI, H. et al. Energy utilization evaluation of CCHP systems. **Energy and Buildings**, v. 38, p. 253–257, 2006. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0378778805000976>>. Acesso em: 11 out. 2018.

LIAN, Z. T.; CHUA, K. J.; CHOU, S. K. A thermoeconomic analysis of biomass energy for trigeneration. **Applied Energy**, London, v. 87, n. 1, p. 84–95, 2010. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261909002797?via%3Dihub>>. Acesso em: 18 dez. 2018.

LIU, M.; SHI, Y.; FANG, F. Combined cooling, heating and power systems: a survey. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 35, p. 1–22, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2009.07.003>>. Acesso em: 24 set. 2018.

MATELLI, J. A. Conceptual design of biomass-fired cogeneration plant through a knowledge-based system. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, Rio de Janeiro, v. 38, p. 535–549, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s40430-015-0326-4>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

MATELLI, J. A.; BAZZO, E. On the parameters of performance of combined refrigeration and power plants. **International Journal of Refrigeration**, Surrey, v. 36, n. 8, p. 2169–2175, 2013. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0140700713001588>>. Acesso em: 28 set. 2018.

MATELLI, J. A.; BAZZO, E.; SILVA, J. C. An expert system prototype for designing natural gas cogeneration plants. **Expert Systems with Applications**, New York, v. 36, n. 4, p. 8375–8384, 2009. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0957417408007896>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

MATELLI, J. A.; BAZZO, E.; SILVA, J. C. Development of a case-based reasoning prototype for cogeneration plant design. **Applied Energy**, London, v. 88, n. 9, p. 3030–3041, 2011. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261911001619>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

MATELLI, J. A.; SILVA, J. C.; BAZZO, E. Cogeneration design problem: computational complexity analysis and solution through an expert system. **Engineering Computations**, Swansea, v. 31, n. 6, p. 1034–1051, 2014. Disponível em: <<http://www.emeraldinsight.com/doi/10.1108/EC-03-2012-0045>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

MELLI, R.; SCIUBBA, E. A prototype expert system for the conceptual synthesis of thermal process. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 38, n. 15–17, p. 1737–1749, 1997. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890496001860>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

NASERABAD, S. N.; MEHRPANAHI, A.; AHMADI, G. Multi-objective optimization of HRSG configurations on the steam power plant repowering specifications. **Energy**, v. 159, p. 277–293, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360544218311952>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

OGORURE, O. J. et al. Energy, exergy, environmental and economic analysis of an agricultural waste-to-energy integrated multigeneration thermal power plant. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 171, p. 222–240, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.05.093>>. Acesso em: 14 nov. 2018.

ONDECK, A.; EDGAR, T. F.; BALDEA, M. A multi-scale framework for simultaneous optimization of the design and operating strategy of residential CHP systems. **Applied Energy**, London, v. 205, n. sept., p. 1495–1511, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261917311005>>. Acesso em: 19 out. 2018.

PETROBRAS. **Gasolina e diesel**: preços médios de diesel e gasolina às distribuidoras sem tributos. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-as-distribuidoras/gasolina-e-diesel/>>. Acesso em: 22 nov. 2018.

REN21. **Renewables 2018 global status report**. Paris, 2018.

SILVA, J. C. **Expert system prototype for hydraulic system design focusing on concurrent engineering aspects**. 1998. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 1998. Disponível em: <<https://repositorio.ufsc.br/bitstream/handle/123456789/77609/140111.pdf?sequence=1>>. Acesso em: 07 nov. 2018.

SILVA, J. C.; BACK, N. Shaping the process of fluid power system design applying an expert system. **Research in Engineering Design**, v. 12, p. 8–17, 2000. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s001630050020>>. Acesso em: 27 abr. 2018.

STOECKER, W. F. **Design of thermal systems**. Tokyo: McGraw-Hill Kogakusha, 1971. 244 p.

URBANUCCI, L.; TESTI, D. Optimal integrated sizing and operation of a CHP system with Monte Carlo risk analysis for long-term uncertainty in energy demands. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 157, p. 307–316, 2018. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890417311597>>. Acesso em: 16 out. 2018.

VLASSOV, D. **Combustíveis, combustão e câmaras de combustão**. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 185 p.

VOLL, P. et al. Superstructure-free synthesis and optimization of distributed industrial energy supply systems. **Energy**, v. 45, n. 1, p. 424–435, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.041>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

VOLL, P. et al. Automated superstructure-based synthesis and optimization of distributed energy supply systems. **Energy**, v. 50, p. 374–388, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2012.10.045>>. Acesso em: 28 abr. 2018.

WANG, L. et al. Systematic optimization of the design of steam cycles using MINLP and differential evolution. **Journal of Energy Resources Technology**, New York, v. 136, n. 3, 2014. Disponível em: <<http://energyresources.asmedigitalcollection.asme.org/article.aspx?doi=10.1115/1.4026268>>. Acesso em: 17 nov. 2018.

WANG, X. et al. Multi-objective optimization of a gas turbine-based CCHP combined with solar and compressed air energy storage system. **Energy Conversion and Management**,

Oxford, v. 164, p. 93–101, 2018a. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890418301985>>. Acesso em: 06 nov. 2018.

WEI, X. et al. Operation strategy and economic analysis of biogas CCHP system including compressed air energy storage. In: CHINESE CONTROL CONFERENCE, 36., 2017, Dalian. **Proceedings...** 2017. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/document/8028806/>>. Acesso em: 10 set. 2018.

YAO, E. et al. Multi-objective optimization and exergoeconomic analysis of a combined cooling, heating and power based compressed air energy storage system. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 138, p. 199–209, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890417300857>>. Acesso em: 10 set. 2018.

YOKOYAMA, R.; HASEGAWA, Y.; ITO, K. A MILP decomposition approach to large scale optimization in structural design of energy supply systems. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 43, n. 6, p. 771–790, 2002. Disponível em: <<http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890401000759>>. Acesso em: 10 set. 2018.

YOUSEFI, H.; GHODUSINEJAD, M. H.; KASAEIAN, A. Multi-objective optimal component sizing of a hybrid ICE + PV/T driven CCHP microgrid. **Applied Thermal Engineering**, Oxford, v. 122, p. 126–138, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1359431116320038>>. Acesso em: 16 out. 2018.

ZHANG, X. et al. Distributed generation with energy storage systems: a case study. **Applied Energy**, London, v. 204, p. 1251–1263, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626191730524X>>. Acesso em: 20 set. 2018.

ZHU, Q. et al. Mathematical modelling and optimization of a large-scale combined cooling, heat, and power system that incorporates unit changeover and time-of-use electricity price. **Energy Conversion and Management**, Oxford, v. 133, p. 385–398, 2017. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0196890416309700>>. Acesso em: 10 set. 2018.

APÊNDICE A – NOMENCLATURA UTILIZADA NA OTIMIZAÇÃO

(continua)

Nomenclatura	Equipamento
GT_hp	Turbina a gás de alta pressão
GT_mp	Turbina a gás de média pressão
GT_lp	Turbina a gás de baixa pressão
ICE_hp	MCI de alta pressão
ICE_mp	MCI de média pressão
ICE_lp	MCI de baixa pressão
jw_sist_ICE_hp	Sistema de arrefecimento do motor de alta pressão (água da jaqueta)
jw_sist_ICE_mp	Sistema de arrefecimento do motor de média pressão (água da jaqueta)
jw_sist_ICE_lp	Sistema de arrefecimento do motor de baixa pressão (água da jaqueta)
HRSG_hp_GT	Caldeira de rec. a alta pressão conectada à saída da turbina a gás
HRSG_mp_GT	Caldeira de rec. a média pressão conectada à saída da turbina a gás
HRSG_lp_GT	Caldeira de rec. a baixa pressão conectada à saída da turbina a gás
HRSG_hp_ICE	Caldeira de recuperação a alta pressão conectada à saída do MCI
HRSG_mp_ICE	Caldeira de recuperação a média pressão conectada à saída do MCI
HRSG_lp_ICE	Caldeira de recuperação a baixa pressão conectada à saída do MCI
ICE_AC_hp	MCI dedicado a um sist. de refrigeração (alta pressão)
ICE_AC_mp	MCI dedicado a um sist. de refrigeração (média pressão)
ICE_AC_lp	MCI dedicado a um sist. de refrigeração (baixa pressão)
boiler_hp	Caldeira de alta pressão
boiler_mp	Caldeira de média pressão
boiler_lp	Caldeira de baixa pressão
ST_hp_1	Turbina a vapor de condensação de alta pressão com 2 extrações
ST_hp_2	Turbina a vapor de extração de alta pressão (2 extrações)
ST_hp_3	Turbina a vapor de extração de alta pressão (1 extração)
ST_mp_1	Turbina a vapor de condensação de média pressão com 1 extração
ST_mp_2	Turbina a vapor de extração de média pressão (1 extração)
ST_lp	Turbina a vapor de condensação de baixa pressão
jw_sist_ICE_AC_hp	Sist. de arref. do MCI alta pressão dedicado ao AC (água jaqueta)

APÊNDICE A – NOMENCLATURA UTILIZADA NA OTIMIZAÇÃO

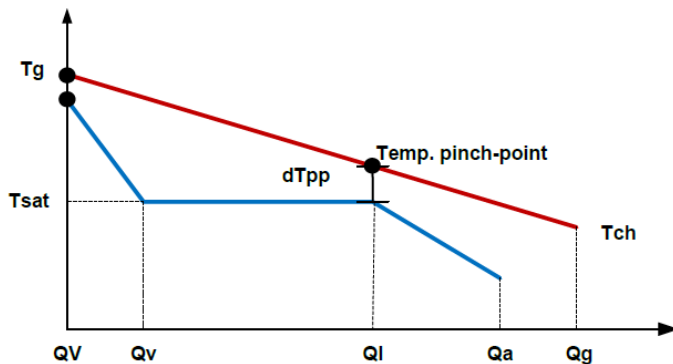
(conclusão)

Nomenclatura	Equipamento
jw_sist_ICE_AC_mp	Sist. de arref. do MCI média pressão dedicado ao AC (água jaqueta)
jw_sist_ICE_AC_lp	Sist. de arref. do MCI baixa pressão dedicado ao AC (água jaqueta)
valve_hp	Válvula de expansão que gera vapor para média pressão
valve_mp	Válvula de expansão que gera vapor para baixa pressão
desuper_hp	Dessuperaquecedor conectado à saída da válvula de alta pressão
desuper_mp	Dessuperaquecedor conectado à saída da válvula de média pressão
HE	Trocador de calor - água quente a partir do vapor de baixa pressão
EB	Aquecedor de água elétrico
GB	Aquecedor de água a gás
AC_CC	Sist. de refrig. por absorção (acionamento: câmara de combustão)
AC_lp	Sist. de refrig. por absorção (acionamento: vapor da linha de baixa)
EC	Sist. de refrig. elétrico

APÊNDICE B – DESENVOLVIMENTO DA EQUAÇÃO 9

O desenvolvimento da equação 9 é baseada em trigonometria ou semelhança de triângulos aplicada no gráfico da temperatura em função do calor do lado do gás e da água em uma caldeira de recuperação, conforme Figura 22.

Figura 22 – Gráfico temperatura x Fluxo térmico numa caldeira de recuperação



Fonte: Produção do próprio autor

Por semelhança de triângulos, tem-se que:

$$\frac{Tg - Tch}{Qg - 0} = \frac{Tg - Tpp}{Ql - 0} \quad (1)$$

Logo,

$$Tch = Tg + (Tpp - Tg) \cdot \frac{Qg}{Ql} \quad (2)$$

Como

$$Tpp = Tsat + dTpp \quad (3)$$

tem-se:

$$Tch = Tg + (Tsat + dTpp - Tg) \cdot \frac{Qg}{Ql} \quad (4)$$

Sabe-se também que:

$$Qg = mg \cdot c_{p,g} \cdot (Tg - Tch) \quad (5)$$

$$Ql = mv \cdot (h_v - h_l) \quad (6)$$

onde:

$$mv = \frac{\eta_{cald} \cdot mg \cdot c_{p,g} \cdot (Tg - Tch)}{(h_v - h_0)} \quad (7)$$

Ao se substituir (5), (6) e (7) na equação (2), tem-se a equação desejada:

$$Tch = Tg + (Tsat + dTpp - Tg) \cdot \frac{(h_v - h_0)}{\eta_{cald}(h_v - h_l)}$$

Onde:

T_{ch} é a temperatura de chaminé,

Q_g é o calor perdido pelos gases de exaustão até ser lançado no ambiente pela chaminé,

T_{sat} é a temperatura de saturação do líquido,

T_g é a temperatura de exaustão dos gases,

dT_{pp} é o chamado delta de *pinch point*,

Q_l é o calor necessário para elevar líquido saturado até a temperatura de vapor desejada.

h_0 é a entalpia da água em temperatura ambiente,

h_v é a entalpia do vapor na temperatura desejada,

h_l é a entalpia do líquido saturado,

m_v é a vazão de vapor que passa na caldeira de recuperação.