



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

HEBER CLAUDIUS NUNES SILVA

**METODOLOGIA TÉCNICO-FINANCEIRA E MODELAGEM DE SISTEMAS DE
COGERAÇÃO PARA EDIFÍCAÇÕES: estudo de caso**

Recife

2019

HEBER CLAUDIUS NUNES SILVA

**METODOLOGIA TÉCNICO-FINANCEIRA E MODELAGEM DE SISTEMAS DE
COGERAÇÃO PARA EDIFICAÇÕES: estudo de caso**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Área de concentração: Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.

Coorientador: Prof. Dr. Alvaro Ântonio Ochoa Villa.

Recife

2019

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

S586m Silva, Heber Claudius Nunes.
Metodologia técnico-financeira e modelagem de sistemas de cogeração para edificações: estudo de caso / Heber Claudius Nunes Silva. – 2019.
120 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Carlos Charamba Dutra.
Coorientador: Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, 2019.
Inclui Referências e Apêndice.

1. Engenharia Mecânica. 2. Cogeração. 3. Edifícios. 4. Análise econômica. 5. Climas tropicais. I. Dutra, José Carlos Charamba (Orientador). II. Ochoa Villa, Alvaro Antonio (Coorientador). III. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2020-20

HEBER CLAUDIUS NUNES SILVA

**METODOLOGIA TÉCNICO-FINANCEIRA E MODELAGEM DE SISTEMAS DE
COGERAÇÃO PARA EDIFICAÇÕES: estudo de caso**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Mecânica.

Aprovada em: 02 / 08 / 2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr José Carlos Charamba Dutra (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Alvaro Antonio Ochoa Villa (Coorientador)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Jorge Recarte Henriquez Guerrero (Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Ângelo Peixoto da Costa (Examinador Interno)
Instituto Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Carlos Antônio Cabral dos Santos (Examinador Externo)
Universidade Federal da Paraíba

Prof. Dr. Allysson Macário Araújo de Caldas (Examinador Externo)
Instituto Federal da Paraíba

Este trabalho é dedicado a Bacan, que me deu forças para nunca desistir e, apesar de todas as pedras no caminho, me cercou de pessoas maravilhosas que, todos os dias, me dão motivos para levantar e agradecer.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que colaboraram com a produção deste trabalho, colegas, professores, orientador, minha esposa Mirella, coorientador, órgão de fomento, UFPE, IFPE e UVR. Agradeço a compreensão e dedicação dispensada ao longo de toda essa jornada de erros e acertos.

A todos, meu sincero muito obrigado!

De fato, como podia, um operário em construção, compreender por que um tijolo valia mais do que um pão? Tijolos ele empilhava com pá, cimento e esquadria. Quanto ao pão, ele o comia... Mas fosse comer tijolo! E assim o operário ia, com suor e com cimento, erguendo uma casa aqui, adiante um apartamento, além uma igreja, à frente um quartel e uma prisão: prisão de que sofreria não fosse, eventualmente um operário em construção. (Vinícius de Moares, 1959, p. 8).

RESUMO

Em países com clima tropical, há uma grande necessidade de ar condicionado nos edifícios. Isso se deve às altas temperaturas e alta umidade nos trópicos e regiões subtropicais como o Nordeste do Brasil. Em geral, as faturas de eletricidade revelam que muito dinheiro é gasto na tentativa de obter conforto térmico utilizando sistemas de ar condicionado regulares para remover o calor dos edifícios. A eletricidade consumida por esses sistemas pode representar cerca de 50% da conta total de eletricidade. Este trabalho propõe a utilização de um sistema de cogeração na reitoria de um campus universitário. Um sistema de cogeração compreende um motor como movedor primário, uma caldeira auxiliar, para complementação do calor fornecido pelo motor, dois tanques de acumulação, um de água fria e outro de água quente, que funcionam como pulmões para o horário de ponta e um *chiller* de absorção de efeito único para remover o excesso de calor. Algumas das vantagens do uso deste tipo de sistema é que o aproveitamento do calor residual dos equipamentos, aumentando a eficiência global do sistema, descentralização de fornecimento de energia. Essa solução foi aplicada à edifícios da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em João Pessoa, Nordeste do Brasil, onde há demanda por frio (climatização) e o consumo de energia é extremamente alto, já que a umidade relativa média anual e a temperatura do bulbo seco são cerca de 75% e 27°C, respectivamente.

Palavras-chave: Cogeração. Edifícios. Análise econômica. Climas tropicais.

ABSTRACT

In countries with tropical climate, there is a great need for air conditioning in buildings. This is due to high temperatures and high humidity in the tropics and subtropical regions such as northeastern Brazil. In general, electricity bills show that a lot of money is spent trying to achieve thermal comfort by using regular air conditioning systems to remove heat from buildings. The electricity consumed by these systems can represent about 50% of the total electricity bill. This paper proposes the use of a cogeneration system in the rectory of a university campus. A cogeneration system comprises a primary mover motor, an auxiliary boiler to supplement the heat supplied by the engine, two storage tanks, one for cold water and one for hot water, which function as rush hour lungs and a chiller -absorbent absorber to remove excess heat. Some of the advantages of using this type of system is that harnessing waste heat from equipment, increasing overall system efficiency, decentralizing power supply. This solution was applied to the buildings of the Federal University of Paraíba (UFPB) in João Pessoa, Northeast Brazil, where there is demand for cold (climatization) and energy consumption is extremely high, since the average annual relative humidity and temperature of the dry bulb are about 75% and 27°C, respectively.

Keywords: Cogeneration. Buildings. Economic analysis. Tropical climates.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Selo PROCEL Edifica.....	17
Figura 2 -	Gráfico Consumo x Produção energia primária.....	17
Figura 3 -	Tendência de crescimento do consumo de eletricidade no Brasil.....	20
Figura 4 -	Economia de Eletricidade por ações PROCEL.....	21
Figura 5 -	Esquema da tipologia da habitação coletiva no Brasil - plano (à esquerda) e seção transversal (à direita) com os principais ângulos solares correspondentes.....	24
Figura 6 -	Representação psicrométrica do ar condicionado fornecido para o sistema proposto em comparação com o sistema tradicional.....	24
Figura 7 -	Esquema da planta piloto.....	25
Figura 8 -	Capacidade de geração brasileira em 2014 e a previsão para 2024.....	26
Figura 9 -	Esquema do sistema de micro-cogeração.....	27
Figura 10 -	Diagrama esquemático do sistema CCHP.....	28
Figura 11 -	Diagrama esquemático do sistema ARC / ORC.....	30
Figura 12 -	Proposta de sistema de cogeração utilizado para a simulação da construção da reitoria de um campus universitário.....	33
Figura 13 -	Consumo de energia térmica horária de um conjunto de apartamentos.....	34
Figura 14 -	Fluxograma ilustrativo de um sistema de poligeração de energia.....	36
Figura 15 -	Sistema de cogeração de energia (eletricidade e água gelada) a partir do uso de gás natural por meio de uma turbina a gás e <i>chiller</i> de absorção.....	37
Figura 16 -	Sistema de trieração de energia (eletricidade, calor, água gelada) a partir do uso de gás natural por meio de uma motor de combustão interna a gás e <i>chiller</i> de absorção instalado na UFPB.....	38
Figura 17 -	Microturbina <i>Capstone</i> C30.....	40
Figura 18 -	Ciclo de refrigeração por compressão mecânica.....	41
Figura 19 -	<i>Chiller</i> por compressão a vapor para gelar água.....	42
Figura 20 -	Esquema simples do ciclo de refrigeração por absorção.....	42
Figura 21 -	Caldeira de recuperação de uma planta de celulose.....	44

Figura 22 - Classificação das caldeiras de recuperação térmica.....	44
Figura 23 - Torre de Resfriamento Alpina instalada numa Termoelétrica Brasileira.....	46
Figura 24 - Instalação com torre de resfriamento.....	46
Figura 25 - Consumo de energia médio anual.....	50
Figura 26 - Consumo elétrico de duas semanas típicas na UFPB.....	52
Figura 27 - Simulação de TRNSYS para edifícios usando o TYPE 56.....	56
Figura 28 - Foto da tela do <i>Desingbuilder</i> com uma casa renderizada.....	57
Figura 29 - <i>Payback</i> para projetos.....	60
Figura 30 - Demanda elétrica anual da reitoria.....	64
Figura 31 - Demanda decrescente e integralização.....	65
Figura 32 - Esquema do sistema de cogeração em TRNEdit.....	66
Figura 33 - Fluxograma básico para modelagem técnica e financeira do sistema de cogeração.....	73
Figura 34 - Produção de Frio (vermelha), Demanda de frio (azul), Consumo do Chiller (verde), perdas no tanque(amarela) e na tubulação (roxa).....	75
Figura 35 - VPL versus Emissão de CO2.....	78
Figura 36 - Demanda e consumo.....	80
Figura 37 - Demanda elétrica de três dias característicos.....	85
Figura 38 - Estimativa de demanda do Hospital.....	85
Figura 39 - Temperatura de bulbo seco de João Pessoa em 2011.....	86
Figura 40 - Umidade relativa de João Pessoa em 2011.....	86
Figura 41 - Carga primária.....	87

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Indicadores de sustentabilidade.....	55
Tabela 2 -	Consumo de equipamento e iluminação.....	63
Tabela 3 -	Distribuição de consumo elétrico 2011.....	63
Tabela 4 -	Distribuição de consumo elétrico 2012.....	64
Tabela 5 -	Dados do Motor.....	67
Tabela 6 -	Dados do <i>chiller</i> mecânico.....	68
Tabela 7 -	Carga Parcial compressor parafuso.....	69
Tabela 8 -	Eficiência caldeira.....	69
Tabela 9 -	Eficiência do <i>chiller</i> de absorção.....	70
Tabela 10 -	Dados da Rede de distribuição.....	70
Tabela 11 -	Equipamentos selecionados para reitoria.....	71
Tabela 12 -	Preço da Eletricidade.....	73
Tabela 13 -	Preço do Gás.....	74
Tabela 14 -	Cargas parciais máximas.....	76
Tabela 15 -	Resultados financeiros (1 euro = 4,5 reais).....	77
Tabela 16 -	Simulação com microturbinas.....	79
Tabela 17 -	Resultados financeiros.....	81
Tabela 18 -	Cargas parciais máximas.....	81
Tabela 19 -	Resultados financeiros.....	81
Tabela 20 -	Cargas parciais máximas.....	81
Tabela 21 -	Configurações, resultados ambientais e econômicos.....	82
Tabela 22 -	Fornecimento de calor.....	83
Tabela 23 -	Capacidade de Refrigeração do Hospital.....	83
Tabela 24 -	Distribuição dos equipamentos de Refrigeração.....	84
Tabela 25 -	Dias característicos.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACF	Fluxo de Caixa Anual
BEN	Balço Energético Nacional
BF	Óleo Bruto
C_{ac}	Consumo de Ar condicionado
CCHP	Combined Cooling Heat and Power
C_e	Consumo de Equipamentos
C_i	Consumo de Iluminação
COP	Coefficiente de Performance
ENCE	Etiqueta Nacional de Conservação de Energia
FC	Fluxo de Caixa
FUE	Fator de Utilização de Energia
GLP	Gás Liquefeito do Petróleo
HPD	Número de Horas Trabalhadas
HRSR	Caldeira de Recuperação
i	Taxa de Juros
IC	Capacidade de Iluminação
IES	Instituto de Energias Sustentáveis
$Inv_{inicial}$	Investimento Inicial
ISO	International Organization for Standardization
MCI	Motor de Combustão Interna
ORC	Ciclo Rankine Orgânico
PBGAS	Companhia Paraibana de Gás
PES	Economia de Energia Primária
PIB	Produto Interno Bruto
PNE	Plano Nacional Energético
PROCEL	Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica
SPB	Tempo de Retorno de Investimento
TAS	Thermal Analysis Simulation
TC	Consumo Total
TCI	Custo Total de Investimento
TIR	Taxa Interna de Retorno

TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TR	Toneladas de Refrigeração
UFPB	Universidade Federal da Paraíba
UFPE	Universidade Federal de Pernambuco
VDD	Base Variavel Grau Dia
VPL	Valor Presente Líquido
WD	Número de Dias Úteis no Mês

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	REVISÃO DE EDIFÍCIOS BRASILEIROS	16
1.2	PROBLEMATICA.....	18
1.3	JUSTIFICATIVA.....	21
1.4	OBJETIVOS GERAL E ESPECÍFICOS.....	21
1.5	ESTRUTURA DA TESE.....	22
2	ESTADO DA ARTE.....	23
2.1	CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DO ESTUDO.....	34
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	36
3.1	SISTEMAS DE POLIGERAÇÃO.....	36
3.2	MÁQUINAS TÉRMICAS E COMPONENTES DE SISTEMAS DE GERAÇÃO.....	38
3.2.1	Motores de Combustão Interna.....	38
3.2.2	Turbinas a Gás.....	39
3.2.3	Sistemas de Condicionamento de ar.....	40
3.2.3.1	<i>Chiller de Compressão de Vapor.....</i>	40
3.2.3.2	<i>Chiller de Absorção.....</i>	42
3.2.4	Caldeiras de Recuperação.....	44
3.2.5	Torres de Resfriamento.....	45
3.3	DEMANDA ENERGÉTICA.....	47
3.3.1	Dias Característicos.....	51
3.3.2	Configurações de Sistema Energético.....	52
3.3.3	Seleção de Indicador.....	54
3.4	PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS	55
3.4.1	TRNSYS.....	56
3.4.2	Design Builder.....	57
3.5	PARÂMETROS FINANCEIROS.....	58
3.5.1	Valor Presente Líquido.....	59
3.5.2	Taxa Interna de Retorno.....	59
3.5.3	Tempo de Retorno de Capital (Payback).....	59
4	METODOLOGIA.....	61

5	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
6	CONCLUSÕES	88
6.1	TRABALHOS FUTUROS.....	89
	REFERÊNCIAS.....	90
	APÊNDICE A – Eficiência do <i>chiller</i> de absorção	103

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo será feita uma breve introdução dos temas abordados na tese. Será discutido neste capítulo as características de levantamento de demanda térmica de edifícios, qual a problemática que a tese tenta solucionar, objetivos geral e específico deste trabalho.

1.1 REVISÃO DE EDIFÍCIOS BRASILEIROS

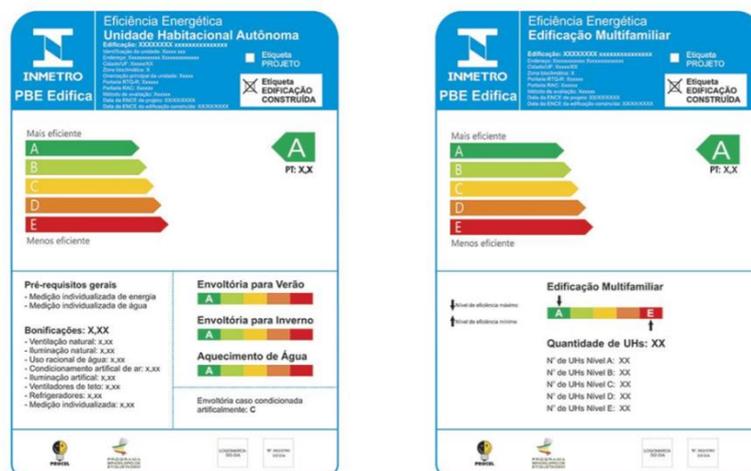
A busca por melhorias passa atualmente por todas as áreas, inclusive pela construção civil. Estudos comprovam a necessidade de melhorar os padrões de edifícios brasileiros com a utilização de parâmetros de conforto para aumentar a eficiência energética e economizar energia (Oliveira *et al.*, 2015). O crescimento da população, o desenvolvimento no setor de construção, o aumento do conforto e do tempo gasto dentro dos edifícios indica crescimento na demanda de energia para edifícios (Fossati *et al.*, 2016). No Brasil ainda não há uma cultura de construção de arquiteturas ambientalmente amigáveis ou que tenham bom desempenho energético e as pessoas são obrigadas a tolerar altas temperaturas, ou altos consumos energéticos. O setor de edifícios consome cerca de um terço da energia em países com economia desenvolvida (Janda 2013).

No Brasil, o consumo de eletricidade dos prédios representa aproximadamente 10% da matriz energética, segundo Fossati *et al.* (2016) e já existem algumas normas diretrizes que tem o objetivo de melhorar a performance energética de edifícios, como os requisitos técnicos para classificação do nível de eficiência energética de edifícios comerciais, de serviço e públicos (RTQ-C) e os requisitos de avaliação da conformidade para o nível de eficiência energética dos edifícios comerciais, de serviço e públicos (RAC-C), ambas criadas em 2009. Em junho de 2014, o Governo Federal promulgou a Instrução Normativa MPOG/SLTI N° 02, que dispõe sobre a obrigatoriedade do uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nas edificações públicas federais, segundo o PROCEL (2017). O PROCEL edifica em 2016 conseguiu certificar 29 edificações construídas certificadas. Estima-se que o consumo de energia evitado acumulado, proveniente do conjunto de edificações construídas agraciadas com o Selo PROCEL seja de 8,19 GWh, dos quais 4,63 GWh em 2016. Na Figura 1 está apresentado o selo do PROCEL edifica.

Devido ao crescimento no consumo de eletricidade, nos momentos de pico houve interrupção no fornecimento de energia em grandes cidades, sem falar no crescimento populacional que leva a um aumento na demanda energética. Há uma grande dificuldade da capacidade de produção de energia, em acompanhar o crescimento do consumo, como pode

ser visto na Figura 2. Há trabalhos feitos neste campo, como por exemplo, Oliveira *et al.* (2015) e Brandão *et al.* (2008) que estudaram as influências de parâmetros geográficos e físicos no conforto e consumo energético de edifícios em várias cidades brasileiras.

Figura 1– Selo Procel Edifica.



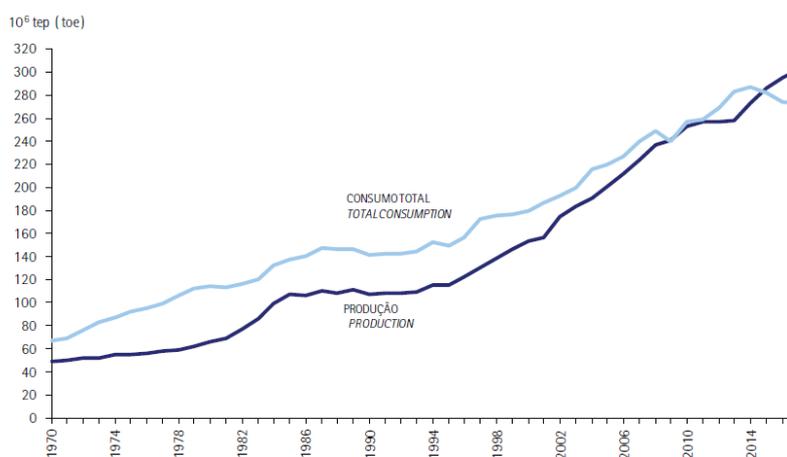
Fonte: PROCEL (2017).

O consumo de energia de um edifício depende fortemente de suas cargas internas e deve proporcionar boa condição de vida ou de trabalho para os ocupantes. Essas cargas dependem de fatores climáticos, como temperaturas externas, velocidade e direção do vento, umidade relativa, localização geográfica do terreno de construção e temperatura média radiante são alguns dos importantes parâmetros de avaliação de edifícios.

Figura 2 – Gráfico Consumo x Produção energia primária.

Gráfico 2.1.b – Fontes Primárias

Chart 2.1.b – Primary Energy



Fonte: BEN (2018).

Esses parâmetros meteorológicos e geográficos são características particulares de cada região ou cidade. Além disso, não se pode esquecer outros fatores que influenciam no conforto térmico de um edifício, como características arquitetônicas dos edifícios, quais são as construções que estão ao redor do edifício e os materiais de construção dos prédios. Essas características somadas vão determinar qual é a necessidade de energia elétrica, frio ou calor de cada edifício. Assim, cada construção tem seu perfil de demanda muito singular, praticamente único, que deve ser analisado cuidadosamente quando se deseja atingir conforto térmico para seus ocupantes.

1.2 PROBLEMÁTICA

O crescimento econômico e financeiro de um país passa pelo desenvolvimento do setor energético. O setor energético é estratégico para todos os setores, pois todos utilizam energia, indústria, transporte, residencial, comércio, agropecuária, serviços e o próprio setor energético. Toda essa demanda deve ser atendida pela matriz energética nacional. No caso do Brasil, há uma matriz bastante diversa, com fontes de energia renováveis como biomassa, energia hidráulica e outras que representam mais de 40% da oferta de energia nacional, segundo o balanço energético nacional de 2018(BEN 2018). É um percentual elevado, quando comparado com outros locais do mundo, a média global, segundo o BEN 2018 é de aproximadamente 13%.

A oferta interna de energia cresceu apenas 1,3%, entre 2016 e 2017. A maior parte desse crescimento foi devido às novas plataformas de petróleo que entram em operação. Isso representa 80% do aumento da oferta. O consumo também aumentou neste mesmo período, 2%. Principalmente devido ao transporte. Transporte e eletricidade representam aproximadamente 46% de todo o consumo de energia do país. Quando visto em curto prazo que o consumo é maior que a oferta, não parece ser um problema tão grave, porém o contínuo aumento da demanda de energia maior que a oferta, pode acarretar cortes, racionamento ou até falta de energia para algum setor.

A oferta de energia elétrica subiu 1,6% em 2017. Porém, a energia hidráulica representava 70% da oferta de energia elétrica, em 2014, teve em 2017 a menor produção de eletricidade dos últimos dez anos devido às condições climáticas do país. Para atender o consumo crescente foi necessário utilizar outras fontes de energia, que não necessariamente foram renováveis. O uso de fontes renováveis caiu de 84,5% para 79,3% no suprimento de eletricidade. O consumo de energia elétrica cresceu 1,2%, no último ano. Outras fontes de energia, como combustíveis fósseis foram acionadas para atender a demanda crescente.

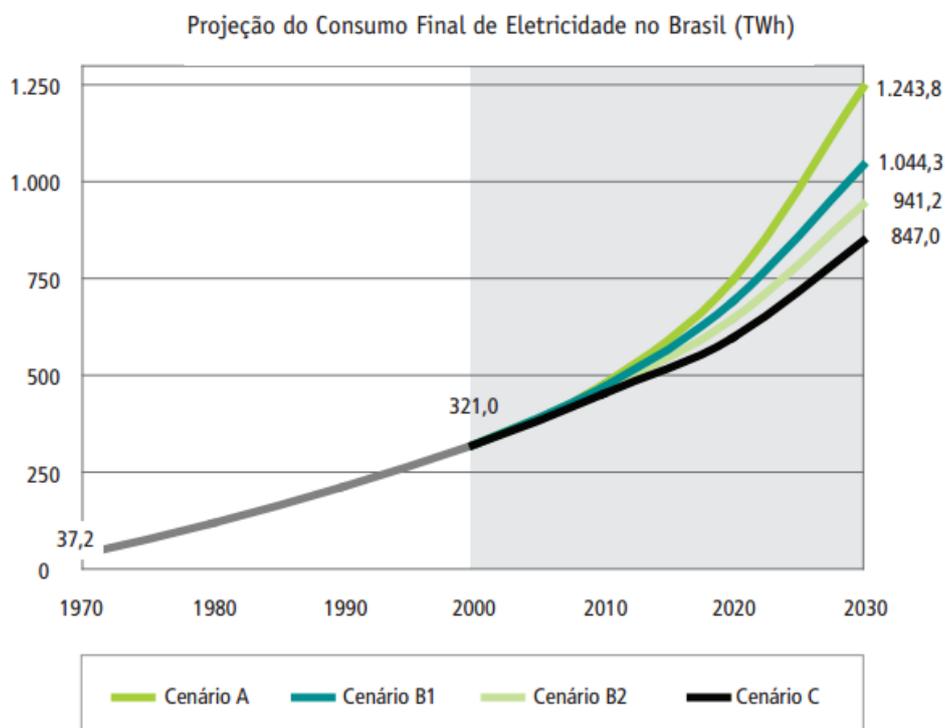
Para um país como o Brasil, que está em desenvolvimento, é importante considerar o consumo de energia de edifícios: comerciais, públicos e residenciais (Borgsteina e Lamberts (2014)). Os setores de residência e serviços correspondem a 14% do consumo de energia primária e aproximadamente 25% da energia elétrica do país. Segundo Carvalho *et al.* (2010), de toda energia destinada a edifícios comerciais, cerca de 70% do consumo é devido aos sistemas de climatização de ambientes. Isso é devido ao tipo de fachada mais utilizada nos edifícios brasileiros e ao sistema de climatização mecânico, que é o mais adotado nesse setor. Em regiões de climas tropicais, como nas cidades litorâneas do Nordeste brasileiro, onde há muita umidade e calor, o percentual de energia consumida devido à climatização pode superar os 70%, podendo se tornar o maior custo mensal de um edifício.

Na Figura 3, pode ser observada a projeção do crescimento do consumo de energia elétrica para o país. Onde o cenário A é o mais otimista e o cenário C o mais pessimista. Isto, analisando do ponto de vista do Produto Interno Bruto (PIB), que possui relação com o consumo de eletricidade, segundo o PNE 2030. Quanto maior o PIB mais eletricidade será consumida. No cenário B1, que é intermediário, o Brasil teria um crescimento anual no consumo de 4,3%, que supera a média de crescimento da oferta de eletricidade. A taxa de crescimento da oferta só superou três vezes 4,3%, nos últimos 10 anos.

Pensando num crescimento econômico acima do esperado, isso levaria o setor energético a buscar mais saídas para atender a demanda energética. Há basicamente duas formas de atender a demanda. Primeiro controlar a demanda de forma autônoma ou induzida, para que a oferta possa atender as necessidades. Ou ampliação da oferta, através de grandes investimentos públicos e privados em centrais hidrelétricas, termelétricas a combustíveis fósseis, usinas nucleares, termelétricas com fontes renováveis, centrais eólicas e estimular a autoprodução.

Este trabalho propõe a autoprodução. Uma solução para tentar economizar energia, emitir menos poluentes e até reduzir custos financeiros em médio prazo, através da integração de um sistema de cogeração para os edifícios de um campus universitário em climas tropicais. Por exemplo, Kalkan *et al.* (2011) propõe um sistema de bomba de calor e painéis fotovoltaicos para atender as demandas elétrica e de calor de um campus universitário na Inglaterra. Através da cogeração seria feito um aproveitamento local do calor residual, que normalmente seria desperdiçado, oriundo da geração de energia elétrica.

Figura 3 – Tendência de crescimento do consumo de eletricidade no Brasil.



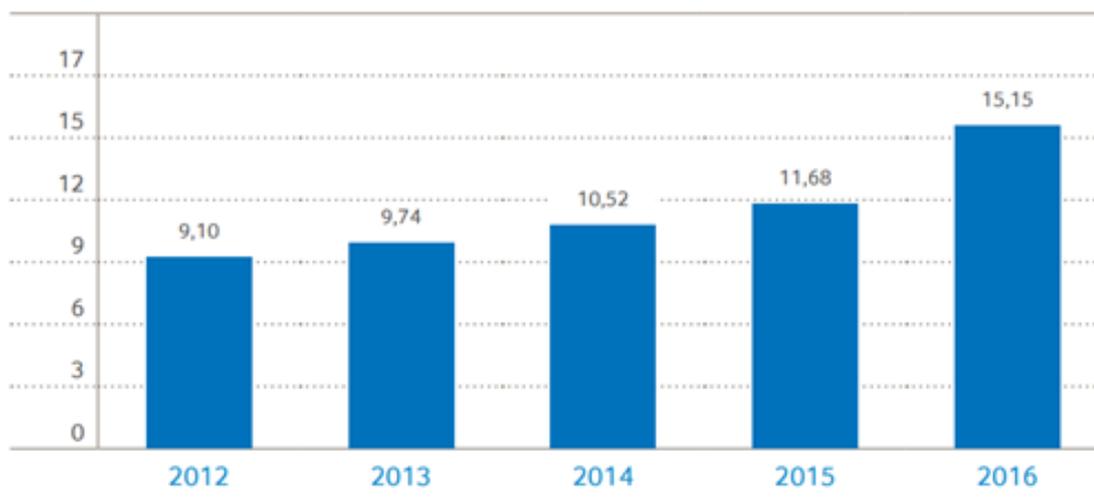
Fonte: PNE 2030 (2016).

A geração de energia elétrica pode substituir o consumo direto da rede elétrica, principalmente em horários de ponta, onde a eletricidade é mais cara. E caso haja sobra de energia, esta eletricidade poderia ser exportada à rede, gerando ingressos financeiros. E com o calor residual é possível atender a demanda de calor, caso exista, e a climatização de ambientes seria possível. Deixando também de utilizar equipamento de climatização mecânico que consomem bastante energia em regiões de clima tropical. Há uma gama de equipamentos que podem ser utilizados de forma direta ou combinação de mais de um tipo de equipamento para atender as necessidades energéticas de cada lugar. Além disso, é possível atingir rendimentos globais superiores a 80% e proporcionar um alívio à rede elétrica, proporcionar a descentralização da rede elétrica e atender de forma satisfatória as demandas de locais mais isolados e longe dos grandes centros. Isso contribui para a estabilidade da rede, maior rendimento do sistema e menos perdas na distribuição de energia. Porém, este tipo de sistema também possui desvantagens. O custo inicial relativamente mais alto do que comparado a sistemas convencionais. Energia térmica deve ser consumida próximo do local onde é produzida para evitar perdas no transporte. O tempo de vida útil desse tipo de empreendimento é mais curto do que de outros tipos de sistemas e pode exigir uma mão de obra mais especializada para manutenção e operação.

1.3 JUSTIFICATIVA

Em junho de 2014, o Governo Federal promulgou a Instrução Normativa MPOG/SLTI Nº 02, que dispõe sobre a obrigatoriedade do uso da Etiqueta Nacional de Conservação de Energia (ENCE) nas edificações públicas federais, segundo a PROCEL (2017). No ano de 2016, foram certificados 29 edifícios com o selo, porém da parte pública há apenas três projetos em andamento (PROCEL 2017) - Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis SC; Centro de Gestão e Armazenamento de Materiais da Câmara de Deputados – Brasília DF; Nova Sede do Fórum Cível e Criminal na Comarca de Porto Velho RO – Porto Velho RO. O que é muito insipiente comparado à quantidade de edifícios universitários que temos espalhados pelo país. Nesse intuito o PROCEL conseguiu economizar mais de 100 bilhões de kWh, desde o início das suas ações em 1986 e vem numa crescente nos últimos anos, no tocante a economia de energia, como pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Economia de Eletricidade por ações PROCEL.



Fonte: PROCEL (2017).

Portanto, baseado nesta justificativa, este trabalho apresenta a seguir os seus objetivos, visando contribuir para melhoria da eficiência energética em edifícios universitários.

1.4 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

O objetivo principal desse trabalho é a modelagem de um sistema de cogeração que possa atender as demandas de frio, calor e eletricidade dos edifícios de uma universidade pública do nordeste brasileiro e com propósito de estudar a viabilidade econômica, energética e ambiental.

Para isso, alguns objetivos devem ser atingidos:

- a) Caracterizar a demanda energética dos edifícios em climas tropicais;
- b) Modelar os equipamentos de geração de frio, calor e eletricidade;
- c) Estudar as configurações dos sistemas de cogeração;
- d) Selecionar indicadores de avaliação;
- e) Integrar os sistemas de cogeração com os edifícios;
- f) Selecionar e aplicação do método de otimização;
- g) Realizar estudo de casos.

1.5 ESTRUTURA DA TESE

Esta tese está dividida em seis capítulos. O primeiro capítulo faz uma breve revisão da situação energética do Brasil e fala de alguns trabalhos realizados na área de análise energética de edifícios. No item 1.2 trata-se da problemática em que a tese esta baseada, fala da busca por soluções energéticas para o aumento crescente da demanda de energia no país. Além disso, resume qual a proposta desse trabalho e suas vantagens e desvantagens. No item 1.3 são descritos os objetivos geral e específicos desta tese. No capítulo 2 faz uma ampla revisão bibliográfica dos temas observados pela tese, como poligeração, análise energética e financeira de centrais de cogeração, tanto no Brasil quanto no exterior. No capítulo 3 foi realizada uma breve fundamentação teórica dos assuntos que são base para a compreensão das discussões e resultados que estão abordados no capítulo 5. O capítulo 4 fundamenta as análises termodinâmica, energética, financeira e ambiental, com um pouco mais de profundidade do que no capítulo da fundamentação teórica. Por fim, no capítulo 6 são feitas as conclusões e previsões para trabalhos futuros. Nesta tese há também um apêndice, pois houve uma grande quantidade de dados utilizados, que estão disponibilizados no capítulo de metodologia e no apêndice, ao final da tese.

2 ESTADO DA ARTE

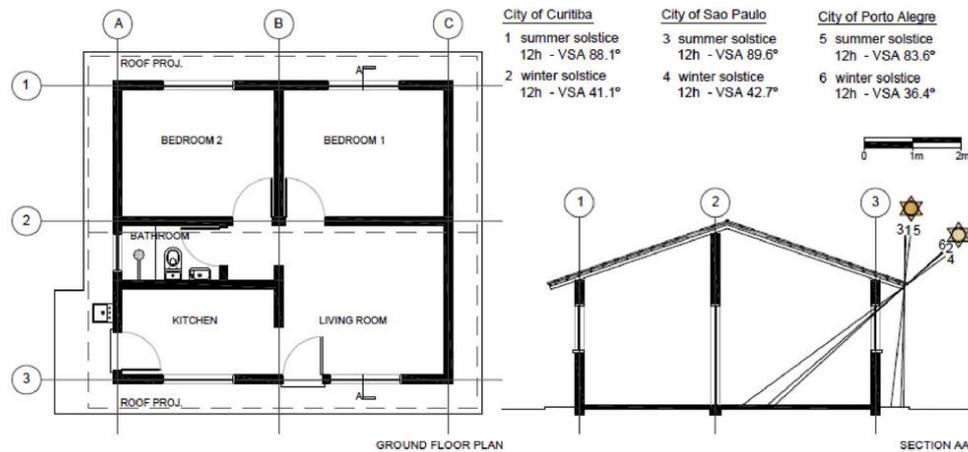
Este capítulo apresenta uma descrição dos estudos mais relevantes sobre os sistemas de cogeração e/ou poligeração, análise termodinâmica e financeira, energia distribuída, entre outros, realizados nos últimos dez anos.

Edifícios públicos e/ou privados com ar-condicionado representam uma parcela significativa do consumo de eletricidade em países sub-tropicais devido às altas temperaturas e umidade neste tipo de região, que inclui o Nordeste do Brasil (Esteves et al., 2016). Como citado em Corton *et al.* (2016), onde foi verificado que os valores caros pagos nas faturas de energia elétrica nos edifícios devem atender as necessidades de conforto térmico. Normalmente, esse valor é de cerca de 50% do total da fatura, como pode ser visto em Szklo *et al.* (2004), quando são utilizados sistemas convencionais de ar-condicionado, isto é, por compressão a vapor (Villareal e Morerira, 2016; Vecchi et al., 2017).

A busca por melhor envelope ou configuração dos edifícios, tem levado os pesquisadores a investigarem diferentes materiais para reduzir a carga térmica e, assim, reduzir a capacidade do equipamento de ar condicionado. Nesse contexto, Tubelo *et al.* (2018) desenvolveu uma análise de sensibilidade para verificar diferentes combinações de envelope através de simulação de construção temporária para o Sudeste do Brasil, incluindo cidades de Curitiba, São Paulo e Porto Alegre, a fim de alcançar um melhor desempenho. Foram testados diferentes materiais com diferentes taxas de permeabilidade ao ar, a fim de encontrar as melhores características de construção convectivas de cada produto encontrados no mercado brasileiro. Primeiramente, foi feita uma análise energética sobre o desempenho desses materiais nos aspectos de conforto térmico dos edifícios e, no segundo, também foi feita a sensibilidade financeira de sua relação custo-benefício. A Figura 5 mostra a configuração de construção padrão usada na simulação.

Uma simulação foi realizada utilizando o software TAS (Thermal Analysis Simulation), que permite utilizar dados brasileiros confiáveis para simular o desempenho térmico real dos edifícios. Os resultados encontrados na análise de sensibilidade recomendaram que os envelopes otimizados poderiam melhorar o conforto térmico em até 97% em comparação a um envelope típico; no entanto, isso aumentaria o custo em cerca de 50%. A partir deste ponto, outros envelopes otimizados foram investigados e mostraram uma redução significativa nos níveis energéticos de conforto térmico e jus, além de 10% do custo. Estes últimos, foram considerados a melhor alternativa para alcançar as condições de conforto térmico e a viabilidade.

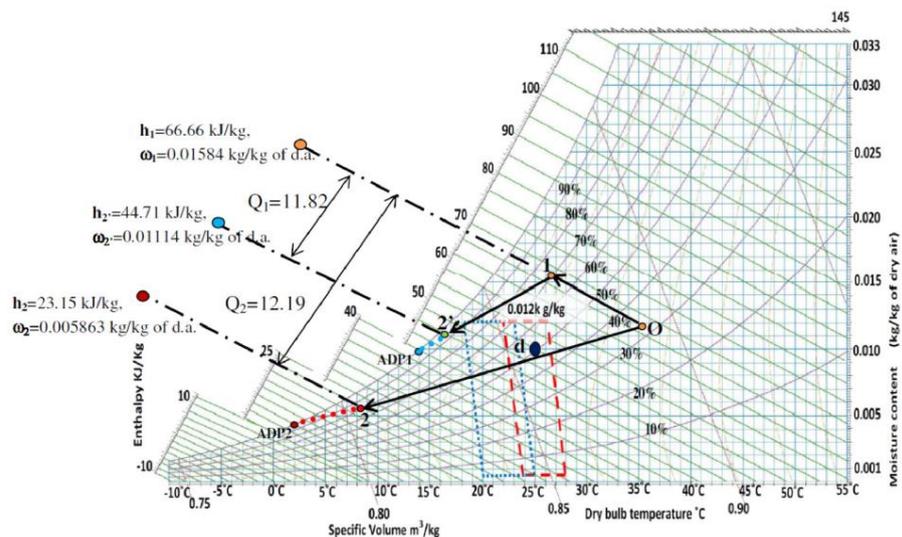
Figura 5 - Esquema da tipologia da habitação coletiva no Brasil - plano (à esquerda) e seção transversal (à direita) com os principais ângulos solares correspondentes para as cidades investigadas.



Fonte: TUBELO *et al.* (2018.).

Outro caso da busca por atingir as necessidades de conforto térmico das pessoas em clima quente e seco, como o nordeste do Brasil, Dhamneya *et al.* (2018) propôs uma nova combinação do ar condicionado para atender ao conforto humano em climas quentes e secos. Neste estudo, um condicionador de ar tradicional acoplado a placas de resfriamento GLASdek 7090 foi investigado. A modelagem computacional foi construída na Plataforma EES e levando em conta vários parâmetros e dados, como; condições climáticas de verão, fabricação de dados para o equipamento resfriador, entre outros. A modelagem é capaz de calcular todos os parâmetros psicrométricos para determinar o desempenho de cada ar condicionado e também permite compará-los energeticamente.

Figura 6 - Representação psicrométrica do ar condicionado fornecido para o sistema proposto em comparação com o sistema tradicional.

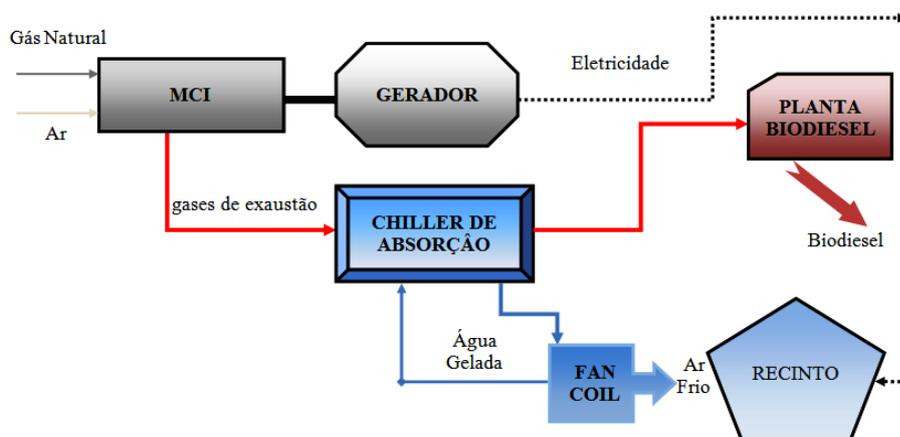


Fonte: DHAMNEYA *et al.* (2018).

Dos resultados simulados obtidos; foi possível concluir que as características de desempenho do sistema proposto foram notavelmente melhoradas, como pode ser visto na economia de energia máxima e mínima de 7% de 5%, respectivamente, e também, foi possível verificar que os efeitos de aparelhos otimizados no ponto de orvalho sobre a poupança de energia. Em relação aos resultados financeiros, os sistemas propostos foram viabilizados pelo retorno em torno de 4 anos.

A cogeração ajuda a melhorar o desempenho dos sistemas de aclimação reutilizando a energia térmica para produzir calor e frio. Nesse sentido, os sistemas de cogeração desempenham uma chave muito importante para aumentar a eficiência energética global (Barigozzi et al., 2014; Basrawi et al., 2017). Em Cavalcante *et al.* (2017), um sistema de alto desempenho energético foi feito através do reuso de energia em dois e três níveis, com a intenção de utilizar a cogeração e / ou a trigeriação. Inicialmente, o estudo foi conduzido experimentalmente através de testes em um sistema composto por um grupo gerador de 100 KVA alimentado por gás natural que gera energia elétrica, por um alternador síncrono acoplado ao eixo do motor. Uma unidade piloto de energia, o sistema de reutilização (fóssil, térmico) foi desenvolvido para estudar e avaliar os processos de produção (insumos de calor para uma usina de biodiesel), bem como o conforto térmico, utilizando energia de cogeração para alcançá-lo. O escape foi reutilizado em um *chiller* de absorção 5TR. A unidade geradora de alto desempenho atendeu as instalações físicas compostas pelo Laboratório de Instrumentação e Controle de Energia e Meio Ambiente, a Oficina Mecânica do Laboratório de Energias Sustentáveis e o espaço do Instituto de Energias Sustentáveis (IES) localizado na Universidade Federal da Paraíba (UFPB).

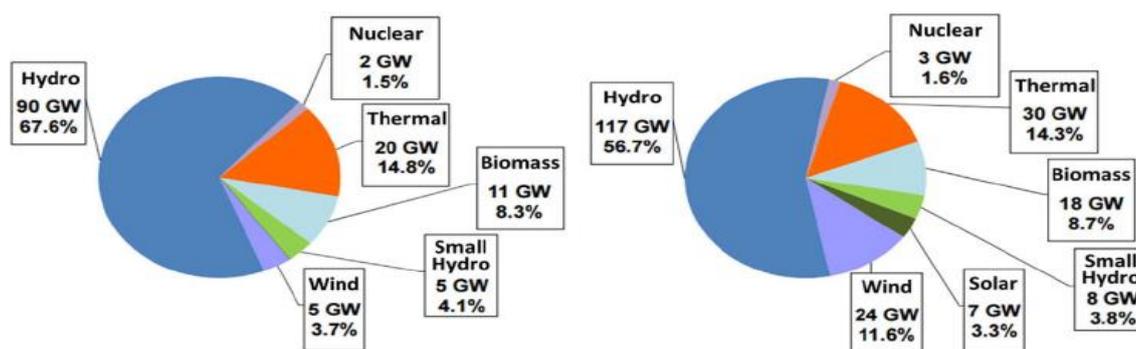
Figura 7 - Esquema da planta piloto.



Fonte: CAVALCANTE *et al.* (2017).

O Brasil tem amplo potencial energético, pois investiu em geração hidrelétrica (Fárias e Ramos, 2016), que produziu 68,1% dos 578,9 TWh gerados em 2016 (BEN, 2018) e também porque diversificou a geração de energia elétrica aproveitando especialmente porque de energia eólica e solar (Pereira *et al.* 2012; Ferreira *et al.*, 2012). No entanto, o país enfrentou crises energéticas, ciclicamente, ao longo dos anos. Em alguns pontos no tempo ocorreram *blackouts* em toda a região (Garcez, 2017), e outras vezes, uma crise é causada pelo uso de energia termelétrica que é aproximadamente seis vezes mais cara que a energia hidrelétrica e, portanto, indústrias e consumidores residenciais têm que enfrentar altas tarifas (Hunt *et al.* 2018). Na Figura 8 mostra-se a capacidade de geração brasileira em 2014 e a previsão para 2024, portanto, mesmo na previsão 2024 a matriz energética do Brasil ainda depende quase totalmente da fonte hidrelétrica.

Figura 8 - Capacidade de geração brasileira em 2014 e a previsão para 2024.

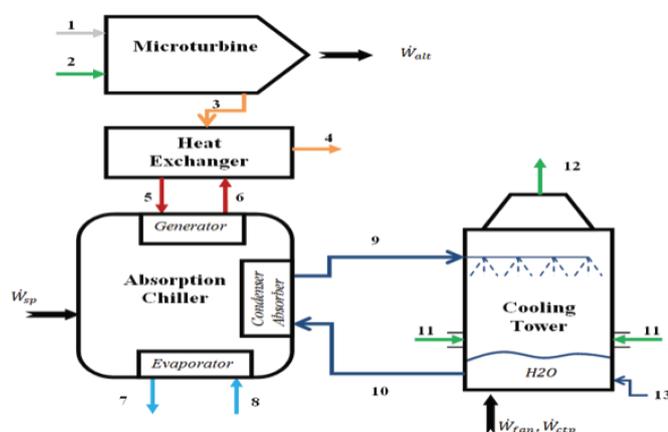


Fonte: Adaptado de HUNT *et al.* (2018).

Com baixo crescimento econômico, observa-se que a oferta interna de energia diminuiu em 3,8% (BEN, 2018) o que mostra que a conexão entre oferta e demanda sempre apresenta desafios quando se fala em energia. Assim, a poligeração tem um lugar importante em pesquisas, como; os feitos por Barma *et al.* (2015); Xia *et al.* (2016). Devido às flutuações nos cenários energéticos e tecnologias aplicadas, muitos estudos têm buscado uma melhor configuração para atender às demandas energéticas do edifício, como pôde ser visto em Brizi *et al.* (2014) onde um estudo sobre um sistema termodinâmico e financeiro de cogeração foi feito, e no qual se constatou que este sistema foi uma ótima escolha para alcançar as demandas energéticas para diversos setores, como residenciais, hotéis, universidades e outros. No mesmo contexto, Bazzo *et al.* (2013) analisaram um sistema de cogeração usando gás natural como fonte de combustível. Neste estudo, eletricidade e água gelada são produzidas para atender às demandas de uma pequena planta. Nos sistemas de poligeração, é possível combinar diferentes tecnologias para atender às demandas de quaisquer edifícios e suas condições. Nesse sentido, a introdução de fontes renováveis representa uma alternativa para

alcançar o objetivo energético, como mostra Rivarolo *et al.* (2013), onde uma análise termoeconômica foi feita para encontrar o melhor desempenho do sistema de poligeração e também aplicando uma análise termodinâmica similar, em Ochoa *et al.* (2016) apresenta uma comparação de dois modelos financeiros baseados na primeira Lei (visão energética) e segunda Lei (visão exergética) da termodinâmica em um sistema de cogeração, Figura 9, que produz eletricidade e água gelada como produto, utilizando gás natural como combustível. Assim, os consumidores industriais, comerciais e residenciais precisam diversificar e otimizar seus recursos energéticos constantemente, já que o uso de eletricidade para diversos fins resultará em gastos que representam uma quantidade significativa do total de despesas gerais de indústrias, empresas e residências (Cabral *et al.* 2017).

Figura 9 - Esquema do sistema de micro-cogeração.



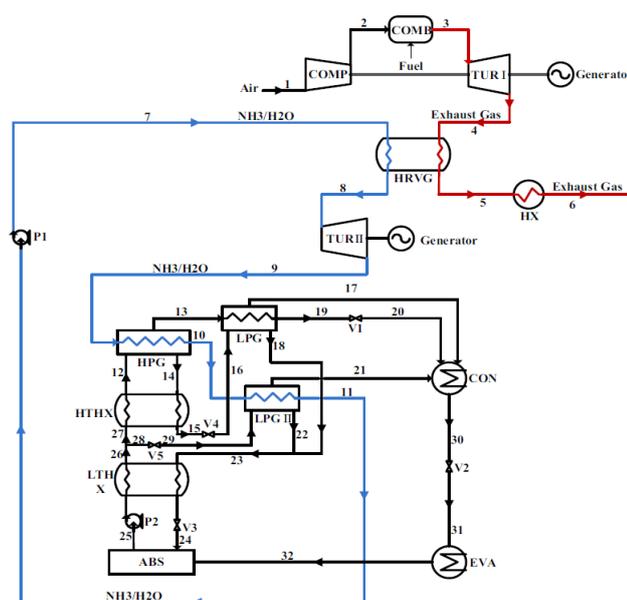
Fonte: OCHOA *et al.* (2017).

Nos sistemas convencionais de ar-condicionado, usados no Brasil, a eficiência geral está entre 30 e 40%. O objetivo é aumentar a eficiência geral em mais de 60%, o que foi obtido por Wu *et al.* (2014) e Ochoa *et al.* (2014). Portanto, é possível economizar energia primária e dinheiro usando sistemas que configuram as necessidades de energia e também usando os aplicativos corretos para otimizar os recursos de energia (Barigozzi *et al.*, 2014 e Basrawi *et al.*, 2017). Os estudos apresentados por Silveira *et al.* (2012) e Sonar *et al.* (2014) mostram que há uma economia de energia potencial entre 8 e 33%. Além disso, Silveira *et al.* (2012) mostraram que investir em sistemas energéticos pode dar um bom retorno, pois, em seu estudo, o retorno foi alcançado em cinco anos, quando a taxa de juros anual era de 12%. Sonar *et al.* (2014) mostraram que os benefícios ambientais oferecidos pelos sistemas de trigeração podem atender ao protocolo de Kyoto e às metas da Agenda 21 para reduzir as

emissões de CO₂, quando tal sistema alcança um parâmetro de eficiência ecológica de quase 95%.

Muitos estudos de pesquisa usaram análise de energia para simular e prever o desempenho dos sistemas de cogeração / trigerção com o objetivo de estabelecer a melhor configuração e estratégia para otimizar sua eficiência (Akbari e Mahmoudi, 2017), combinando sistemas convencionais de cogeração com Ciclos de Rankine para produzir eletricidade e calor simultaneamente (Liang et al., 2014 e Jiang et al., 2017). Isso pode ser feito implementando ou combinando diferentes aplicativos. Como exemplo, combinando CO e metano como fontes de combustível para sistemas de cogeração, integrando assim a modelagem da transferência de calor e massa com as reações eletroquímicas e químicas que ocorrem nelas (Chean et al., 2018). Estudos também foram conduzidos em sistemas de cogeração que usam uma turbina a gás para gerar eletricidade e resfriadores de absorção de efeito simples e / ou duplo para produzir água gelada e quente, e também eletricidade, como; os estudos presentes em Jing e Zheng (2014) onde um novo sistema de cogeração de energia e resfriamento foi proposto usando um ciclo de Kalina para melhorar a eficiência geral, e no mesmo contexto mas produzindo energia, frio e calor simultaneamente, Wang *et al.* (2017) propuseram um sistema de trigerção combinado de ciclos de amônia / água Rankine Cycle e turbina a gás usando um resfriador de absorção de efeito simples e duplo LiBr / Water para atender às demandas de energia como mostrado na Figura 10, gás natural foi usado como combustível.

Figura 10 - Diagrama esquemático do sistema CCHP.



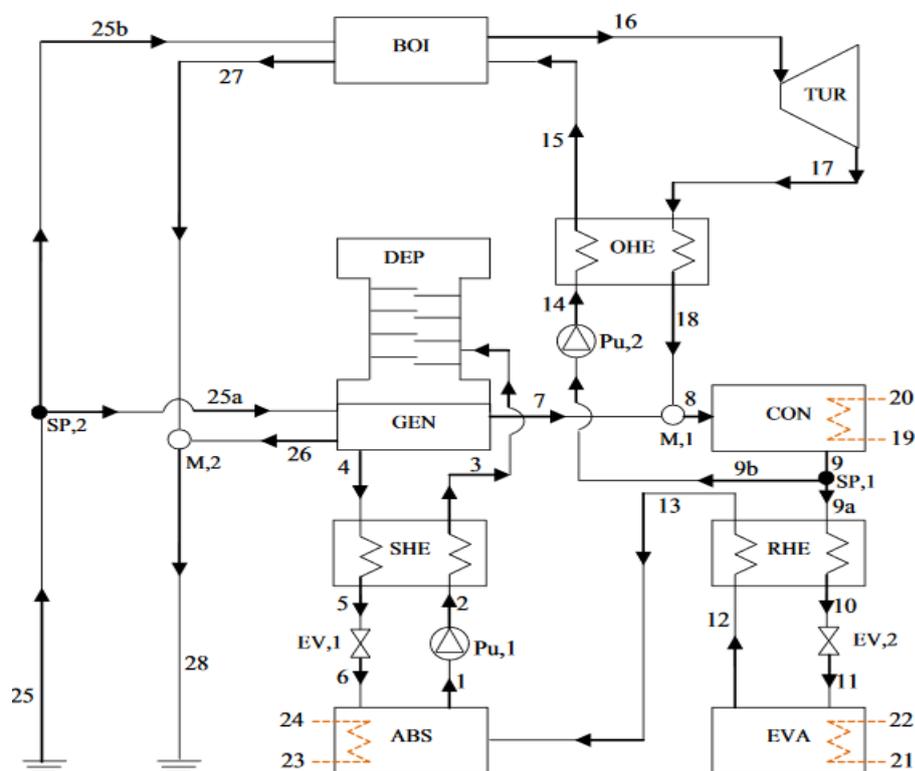
Fonte: WANG *et al.* (2017).

Esse modelo poderia ser modificado na relação de saída de refrigeração e potência na faixa de 1,28 a 3,32 para dar mais flexibilidade à demanda do usuário. Para avaliar a viabilidade, foi realizada uma análise econômica em que se verificou ser uma boa alternativa a ser implementada em sistema real.

A análise de energia é baseada na Primeira Lei da Termodinâmica e é uma ferramenta que é usada para quantificar o valor do fluxo de energia cruzando os volumes de controle entre os componentes que integram os sistemas de cogeração / trigerção. Para ajudar a verificar a qualidade dessa energia, a Segunda Lei da Termodinâmica tem sido usada para completar a análise, devido à sua capacidade de determinar a energia disponível (exergia) e a perda de energia (irreversibilidade). Seus componentes podem gerar a destruição de mais exergia (Hosseinpour et al., 2017 e Zared et al., 2018). Isso é muito relevante para determinar o caminho que deve ser otimizado para aumentar a eficiência geral de uma planta. Portanto, Shokati *et al.* (2018a e 2018b), conduziram um estudo no qual foram usados ciclos de refrigeração por absorção de efeito duplo de amônia-água / cogeração Kalina. Primeiro, eles realizaram um estudo paramétrico abrangente para prever o desempenho e os efeitos de variações simultâneas de diferentes parâmetros operacionais usando análise exergoeconômica. Em segundo lugar, os ciclos foram otimizados para comparar as funções objetivas dos sistemas de cogeração. Finalmente, o período de retorno para todos os ciclos de cogeração estudados em diferentes estados ótimos foi calculado. No mesmo contexto, usando a Segunda Lei como uma ferramenta de simulação e otimização, Koldlar e Mahmoudi (2017) propuseram um sistema combinado incluindo um ciclo *Rankine* orgânico e um ciclo de refrigeração por absorção de amônia / água, Figura 11.

Seus resultados indicaram que deve ser dada prioridade à modificação da turbina, do condensador e do absorvedor, a fim de aumentar a eficiência geral do sistema. Ao buscar a melhor estratégia para produção de eletricidade e resfriamento, Akbari e Mahmoudi (2017) realizaram uma análise teórica sobre um sistema de energia e refrigeração de cogeração que usa dióxido de carbono como fluido de trabalho, pelo qual o sistema poderia funcionar como cogerador produzindo energia e refrigeração ou apenas como sistema de refrigeração. Para tanto, os efeitos sobre os desempenhos termodinâmicos e econômicos do sistema foram quantificados para os principais parâmetros de decisão. Usando o mesmo fluido de trabalho (CO₂), mas identificando a contribuição dos componentes para gerar entropia em um sistema de cogeração solar, Kouta *et al.* (2016), realizam uma análise de custos exergético. Isso revelou que a energia solar foi o principal contribuinte para a geração de entropia, pois representou quase 80% da entropia total gerada.

Figura 11- Diagrama esquemático do sistema ARC / ORC.



Fonte: KOLDLAR; MAHMOUDI (2017).

Um sistema de cogeração pode ser melhorado usando tecnologia alternativa, como energia solar, energia geotérmica e fontes renováveis. No caso da energia solar, a aplicação de refletores de Fresnel para concentrar a fonte de energia tem sido usada para aumentar a eficiência geral dos sistemas de cogeração ou trigeração. Em Heng et al., 2019, um sistema de cogeração solar em escala que utiliza um coletor parabólico e um ciclo *Rankine* orgânico combinado foi estudado e analisado levando-se em conta a zona equatorial na Malásia. O desempenho do sistema de cogeração foi simulado levando-se em conta as medidas diretas de irradiância normal durante 2018. A comparação dos valores de eficiências do sistema solar ao elétrico foi em torno de 8%, em boa concordância com a literatura. Como principais resultados deste estudo, a oportunidade de utilizar o sistema de cogeração solar como uma referência de avaliação para qualquer aplicação do sistema solar térmico nas localidades de radiação solar na Malásia. Outro exemplo foi apresentado em Dabwan e Mokheimer (2017), onde um desempenho energético e econômico de uma usina de cogeração, na qual Refletores Lineares de Fresnel (LFRs) foram utilizados para um campo de energia solar concentrada, a fim de investigar as prováveis modificações necessárias na planta. aumentar a capacidade de geração de eletricidade. Da mesma forma, para aumentar a eficiência global dos sistemas de cogeração / trigeração, Nia *et al.* (2014) realizaram uma investigação experimental para

examinar a possibilidade de criar um circuito de água pré-aquecido para sistemas usando uma estação termoeétrica ativada por um sistema coletor de Fresnel.

É muito relevante, em sistemas de cogeração, usar os recursos energéticos de tal forma que o ganho com isso seja otimizado porque esta prática leva a um alto desempenho e, portanto, à mais alta eficiência geral (Vandewalle e Dhaeseleer, 2014 e Mohammadi, McGowan, 2018). Para explorar isso, muitas técnicas têm sido utilizadas em diferentes plantas de cogeração e trigeração, como os estudos apresentados em Angrisani et al., 2016 mostraram uma análise sobre o desempenho de um sistema de cogeração / trigeração para aplicações reais e também a análise energética mostrada em Ying et al., 2018 para fontes de baixo calor. Utilizando uma estratégia multi-objetivo para maximizar o desenho variável e o armazenamento da energia térmica dos sistemas combinados de cogeração de calor e energia Franco e Versace (2017), conduziram uma análise termoeconômica para aumentar a eficiência geral de um sistema. Eles concluíram que uma estratégia de otimização levou a benefícios econômicos sendo alcançados porque menos energia foi desperdiçada e menos exergia foi perdida. No mesmo contexto, mas usando um algoritmo genético de classificação II como uma ferramenta para otimizar um sistema de cogeração, Yin *et al.* (2018) realizaram um estudo termodinâmico com o objetivo de alcançar o desempenho ótimo de uma planta para a qual eles usaram a temperatura da caldeira, pressões de ciclo e também parâmetros econômicos como funções objetivas. A fim de obter o melhor desempenho do termo acumulador do sistema de cogeração baseado na porosidade do canal do leito e na espessura do comportamento cinético, um modelo foi desenvolvido por Lele *et al.* (2015) que incluiu o acoplamento da transferência de calor e massa com uma reação química em uma geometria 3D próxima da realidade.

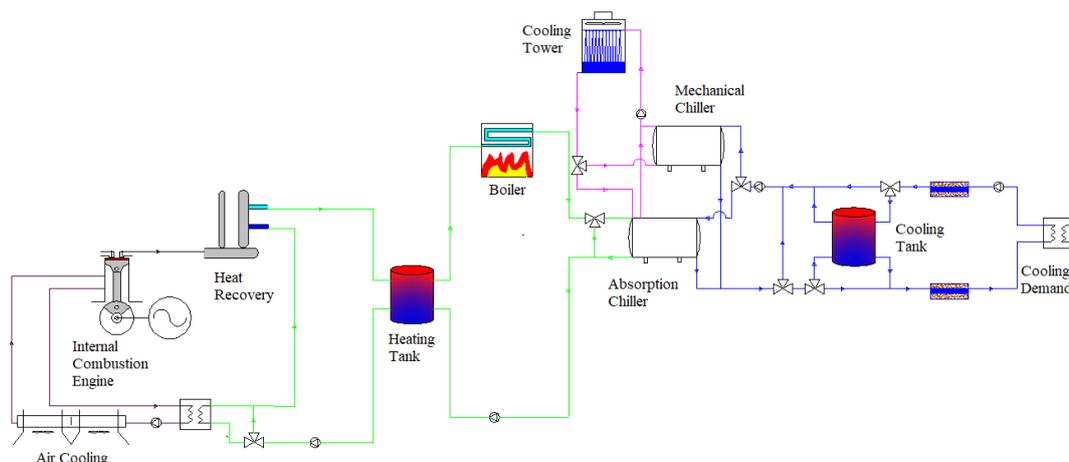
Como já foi mencionado, a energia e a análise exergética têm sido usadas para prever o desempenho dos sistemas de cogeração e também otimizá-los. No entanto, existem outros parâmetros que são usados para otimizar essas plantas, ou seja, aquelas que são usadas na análise ambiental. Ao longo dos anos, a inclusão de parâmetros ambientais na análise de cogeração foi conduzida por várias razões, como; reutilização de energia para aumentar a fonte de ativação do chiller de absorção (Li et al., 2015); usando e modernizando a energia renovável como uma tecnologia substituta para uma usina de aquecimento a carvão para produzir calor e energia para o setor residencial e também para reduzir as emissões de CO₂ (Kalina, 2014); usando o ciclo de vida de uma usina de cogeração e seu caminho para reduzir as emissões de CO₂ como uma ferramenta para determinar uma maneira melhor de produzir eletricidade sem danificar o meio ambiente (Li et al., 2014 e Li et al., 2016); e também

incluindo configurações alternativas e itens de equipamentos, como o ciclo Rankine orgânico para integrar uma planta de cogeração (Safder et al., 2016). O último estudo, conduziu um estudo de risco térmico e termo econômico de uma usina de cogeração de energia e água doce, onde os resultados mostraram que o impacto total do risco acidental e o custo total do produto poderiam ser melhorados dependendo do fluido orgânico aplicado. No mesmo contexto, mas no que diz respeito a uma usina de cogeração de energia de água baseada em um sistema de dessalinização acoplado com o ciclo de Rankine orgânico que foi proposto e analisado por He *et al.* (2016) esses autores foram levados a achados que são significativos para projetar e otimizar qualquer sistema de cogeração de água / energia.

A busca pela implementação de um sistema de cogeração que poderia ser usado para atender a demanda de eletricidade necessária para resfriar um edifício residencial já foi discutida na literatura (Chung et al., 2014). Por exemplo, Rosato *et al.* (2014a e 2014b), levando em consideração as leis italianas, realizou análises energética, econômica e ambiental de um edifício residencial integrado a um sistema de micro-cogeração durante o inverno. Eles descobriram que o uso desse sistema de cogeração levou a um melhor desempenho devido a uma redução substancial no consumo de energia primária sob carga térmica, seguindo uma lógica que permitia a comparação com o sistema convencional. Diferentes aplicações de plantas de cogeração têm sido usadas para atender a demanda de eletricidade para aquecimento e resfriamento de um hospital, como pode ser visto em Gimelli *et al.* (2017). Eles realizaram uma análise técnica e econômica de um sistema de cogeração potencial baseado em um motor a gás considerando o setor italiano. Verificou-se que o preço de exportação da eletricidade e os padrões de eficiência do setor termoeletrico italiano poderiam ser as chaves para otimizar a usina e garantir que seu desempenho seja alto.

No caso de se propor um sistema de cogeração para atender às necessidades dos edifícios educacionais, Silva *et al.* (2019) realizaram uma análise técnica, financeira e ambiental de um sistema de cogeração potencial baseado em um motor a gás considerando o setor brasileiro. A análise foi feita usando uma modelagem desenvolvida no software TRNSYS. A modelagem leva em conta os dados do fabricante do motor de combustão interna, do resfriador de compressão e absorção, e também da caldeira de reserva e do tanque termoacumulador, como mostra a Figura 12. Esta proposta foi realizada considerando os dados de um edifício em um campus universitário em um clima tropical, especificamente em João Pessoa, Paraíba, Brasil.

Figura 12 - Proposta de sistema de cogeração utilizado para a simulação da construção da reitoria de um campus universitário.



Fonte: SILVA *et al.* (2019).

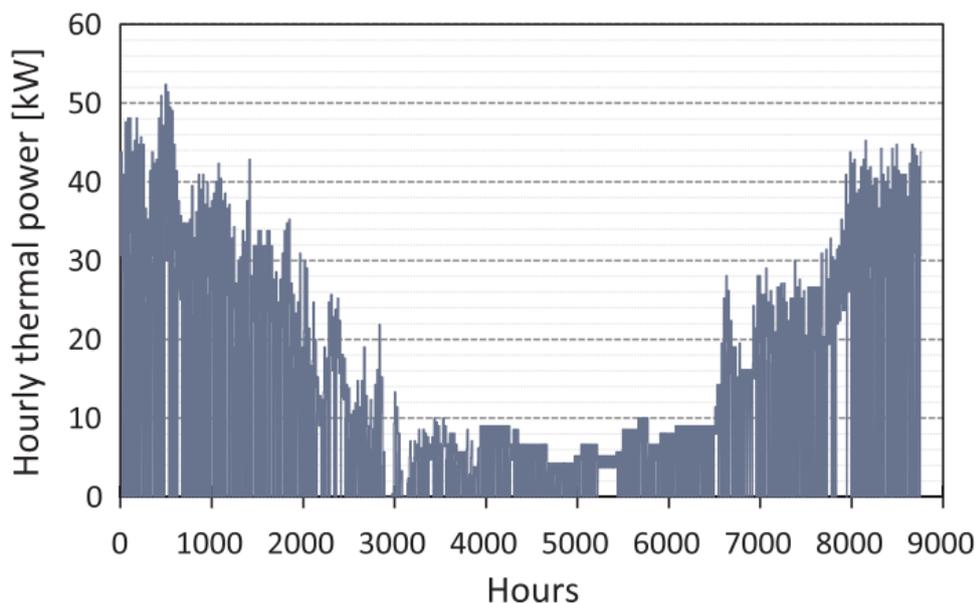
A metodologia aplicada neste projeto foi a primeira; dimensionar o equipamento dos sistemas de acordo com a demanda de energia dos edifícios da universidade, ou seja, demandas elétricas e frias. Em seguida, os equipamentos foram ajustados pela configuração prioritária de produzir eletricidade e / ou resfriamento. Todos os equipamentos estavam analisando em cargas parciais. Vários casos de simulações foram testados para descobrir qual seria a melhor configuração para atender as demandas da universidade, com base na principal máquina térmica utilizada, como; turbina a gás e motor de combustão interna.

Os resultados encontrados dos dados obtidos nas simulações mostraram que este tipo de sistema (eletricidade e refrigeração) poderia ser tecnicamente viável e ambientalmente correto, no entanto, seria melhor utilizar a turbina a gás do que um motor de combustão interna. No que respeita à análise económica, o sistema proposto, utilizando um motor de combustão para satisfazer as exigências eléctricas e de refrigeração da reitoria, não era atractivo devido aos elevados valores de retorno (cerca de 40 a 50 anos). Somente quando os sistemas que usam uma microturbina a gás de 65kW se mostraram financeiramente viáveis, uma vez que o tempo de retorno foi de cerca de 6 anos. Como um fato interessante que foi observado se a maior potência gerada no motor e na caldeira é proporcional ao aumento do VPL e à emissão de poluentes.

Badami et al (2018) propuseram um sistema de micro multigerção composto de um motor, uma caldeira auxiliar, um sistema fotovoltaico e acumulação térmica e eléctrica para abastecimento de casas com o perfil de consumo de energia térmica, como apresentado na Figura 13. Este sistema deve atender um conjunto de 18 apartamentos, num conjunto residencial na Itália. Pelo sistema proposto no trabalho conseguiu-se uma economia de

energia primária (PES) de 23% e um fator de utilização de energia (FUE) de 91%. Do ponto de vista técnico e energético são valores considerados de bons para um sistema de multigeração. Do ponto de vista financeiro, o sistema proposto levaria 12 anos para ser pago.

Figura 13 - Consumo de energia térmica horária de um conjunto de apartamentos.



Fonte: BADAMI *et al.* (2018).

Como proposta de caso estudado (conjunto de edifícios), considerando que os edifícios da universidade assumiram o mesmo perfil de consumo da reitoria e assim, todos os equipamentos foram redimensionados para atender as demandas de energia elétrica e refrigeração, os resultados verificaram essa alternativa técnica e economicamente viável, já que o tempo de retorno foi de 6 a 8 anos, aproximadamente.

2.1. CONTRIBUIÇÃO CIENTÍFICA DO ESTUDO

Este estudo propõe várias contribuições na comunidade científica, tais como:

- a) Modelo energético, financeiro e ambiental que permite determinar a viabilidade de um projeto de cogeração;
- b) A estratégia de energia distribuída que pode ser aplicada a residências complexas, empresas e até indústrias, de acordo com as especificações;
- c) Uma aplicação real do sistema de cogeração de energia direcionado ao setor público do Brasil, especificamente, edifícios universitários, que permitiram avaliar de forma técnica a possibilidade de mudança na produção elétrica e de resfriamento no campus universitário;

- d) De acordo com a análise de sensibilidade do modelo, modificações no regime jurídico do setor de energia, para o autoconsumo e exportação de eletricidade no setor público podem ser propostas e, assim, propor mudanças viáveis na autossuficiência energética dos complexos universitários no Brasil;
- e) Propõe a utilização de um sistema de cogeração no edifício que abriga a reitoria do campus de uma universidade no nordeste do Brasil.

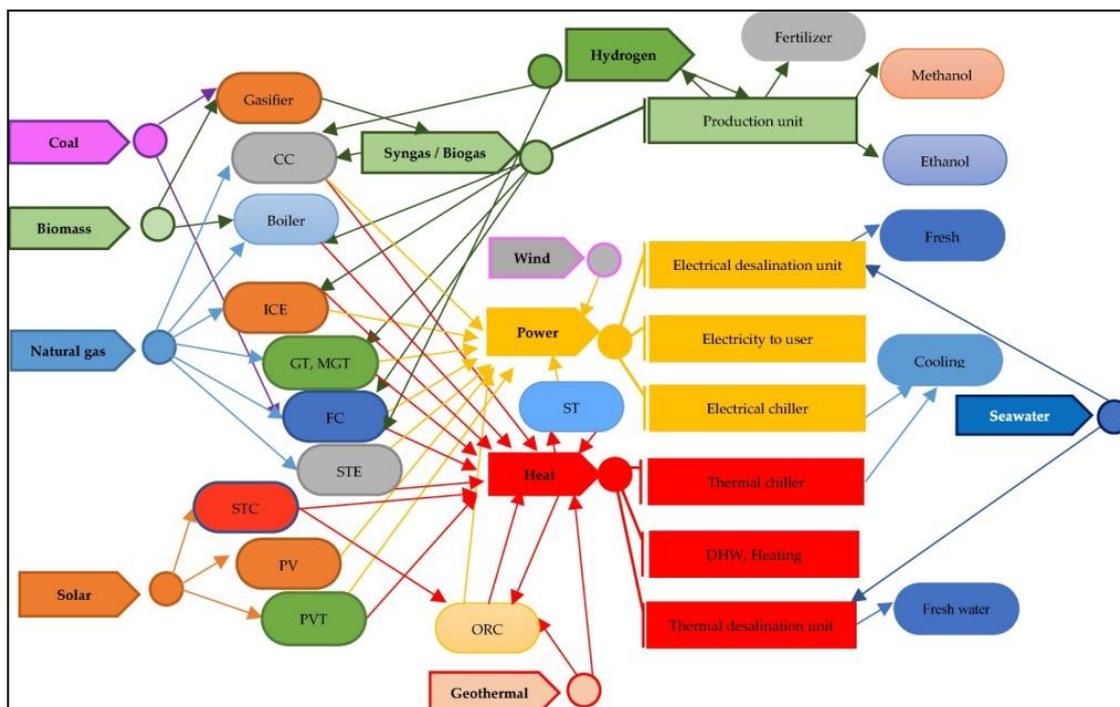
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo será realizada uma breve fundamentação dos temas abordados nesta tese, de forma facilitar a compreensão do que será tratado nos próximos capítulos. A tese trata de simulações computacionais, energia e sistemas de fornecimento, equipamentos térmicos, demanda e oferta de eletricidade, índices de avaliação.

3.1 SISTEMAS DE POLIGERAÇÃO

A poligeração é um processo de incorporação de sistemas energéticos para fornecer várias utilidades (vapor, água quente, fria, gelada, eletricidade) a partir de um ou mais insumos para fornecer vários produtos em função de sistemas mais eficientes, Figura 14.

Figura 14 – Fluxograma ilustrativo de um sistema de poligeração de energia.



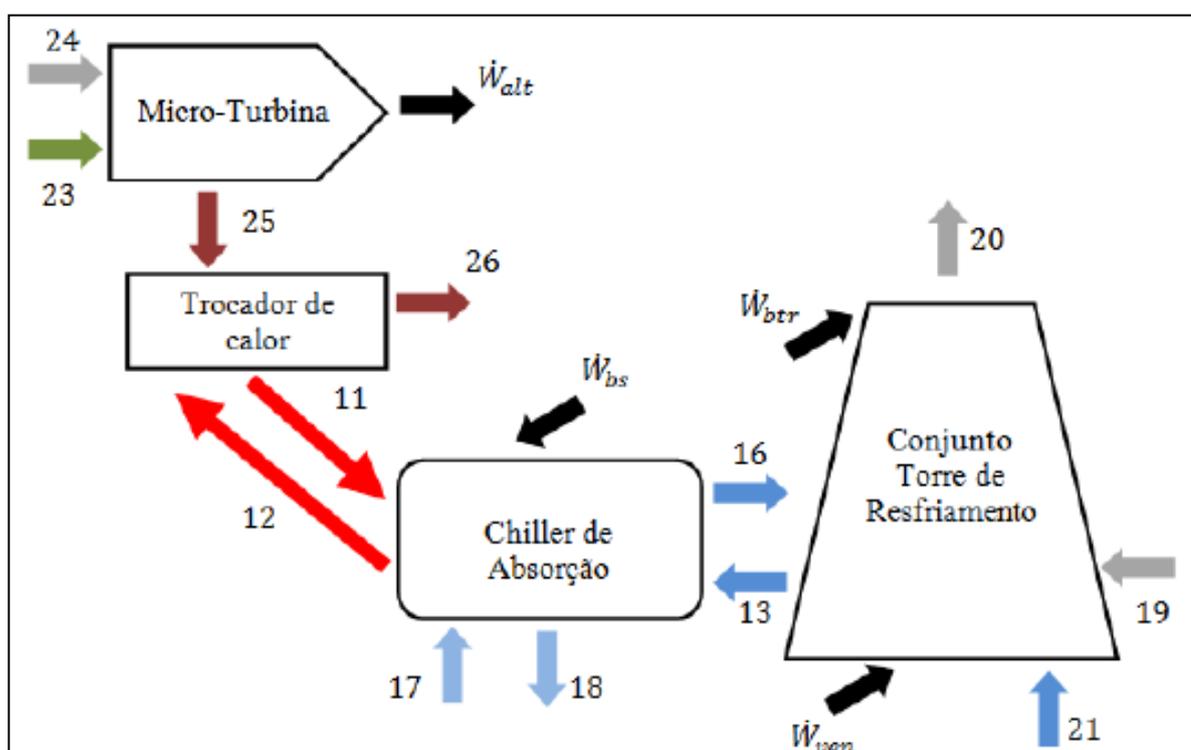
Fonte: CALISE *et al.* (2018).

Mesmo que a complexidade do sistema seja mais elevada, o correto projeto de um sistema de poligeração pode aumentar a eficiência energética, além de reduzir as emissões de poluentes, e incrementar os benefícios econômicos. Há várias vantagens ao utilizar sistemas de poligeração, tais como; uso de energia renováveis (Biomassa, energia solar, eólica, bicomcombustíveis, entre outras), que podem ajudar na redução do aquecimento solar, auto-suficiência energética, e em aspectos sociais e econômicos já que permite a geração de empregos. Outro aspecto importante, é que este tipo de geração de energia, permite a

descentralização para o atendimento de áreas remotas (Raja *et al.*, 2011; Isa *et al.*, 2018). A poligeração pode-se dividir em sistemas de cogeração e trigeração.

A cogeração é um tipo de um sistema de poligeração, onde a partir de um único fonte de energia, como combustível, por exemplo, podem ser gerados, diferentes tipos de energia, tais como; eletricidade, calor, e/ou frio utilizando máquinas térmicas (motores de combustão interna, turbinas a gás e/ou vapor, caldeiras de recuperação, entre outros), Figura 15, elevando a eficiência global dos sistemas convencionais de geração elétrica e térmica (Ochoa *et al.*, 2014). A planta que será estudada nos próximos capítulos se trata de um sistema de cogeração com acumulação térmica.

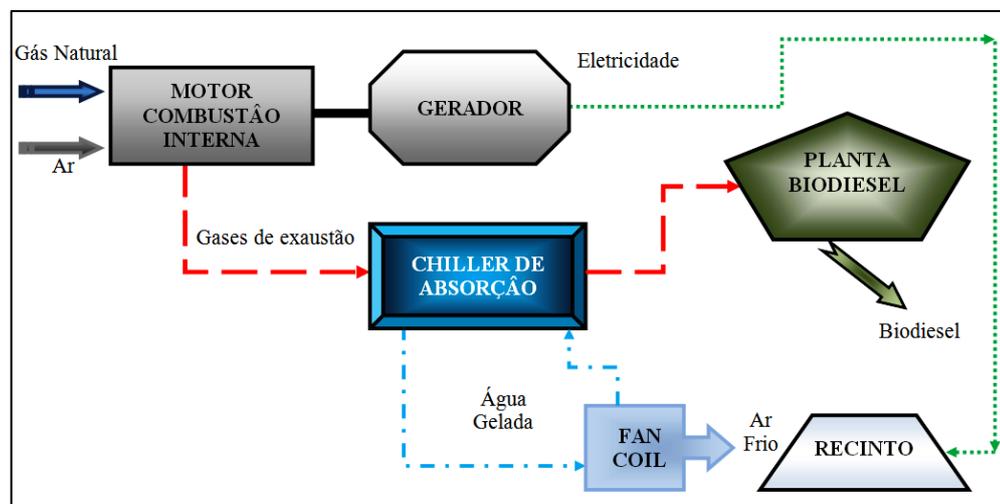
Figura 15 - Sistema de cogeração de energia (eletricidade e água gelada) a partir do uso de gás natural por meio de uma turbina a gás e chiller de absorção.



Fonte: OCHOA *et al.* (2014).

A trigeração é uma outra forma de um sistema de poligeração, onde podem ser gerados, a partir de uma única fonte de energia, três diferentes tipos de energia. Na Figura 16 está mostrado um sistema de trigeração que tem por objetivo elevar a eficiência global dos sistemas de fornecimento de energia, neste trabalho foi comparado um sistema desse tipo com um sistema convencional de geração energia elétrica e térmica (Ochoa *et al.*, 2014). Uma aplicação destes sistemas de trigeração são os chamados *District Heating/Cooling* para o abastecimento total e ou parcial de condomínios.

Figura 16 - Sistema de trieração de energia (eletricidade, calor, água gelada) a partir do uso de gás natural por meio de um motor de combustão interna a gás e *chiller* de absorção instalado na UFPB.



Fonte: CAVALCANTE *et al.* (2017).

Estas configurações de sistemas de *District Cooling/heating* vêm sendo uma solução para conjuntos habitacionais, parques industriais, entre outros, devido à versatilidade. Por exemplo, no trabalho apresentado em Beccalia *et al.*, 2017, foi apresentada uma avaliação de viabilidade técnico e econômica de um sistema de trieração através da utilização de usinas existentes para o atendimento da rede de aquecimento e resfriamento urbano visando os setores terciário e residencial para as condições de seis ilhas na Itália caracterizadas por diferentes condições demográficas e climáticas.

3.2 MÁQUINAS TÉRMICAS E COMPONENTES DE SISTEMAS DE GERAÇÃO

Os componentes principais que integram os sistemas de poligeração são basicamente, máquinas térmicas (motores de combustão interna, turbinas a gás e vapor, caldeiras e geradores), além de recuperadores de calor, tanques termoacumuladores, torres de resfriamentos, entre outros. Através da integração destes componentes, pode-se produzir eletricidade, calor e frio, em função da fonte, seja um combustível (diesel, gás natural) ou através de fontes renováveis (energia solar, eólica, biomassa). Estes componentes apresentam configurações e capacidades que direcionam o dimensionamento dos sistemas de poligeração.

3.2.1 Motores de Combustão Interna

Motores de combustão interna são máquinas térmicas utilizadas capazes de produzir energia mecânica e térmica para o acionamento de outros equipamentos, tais como, veículos,

barcos, geradores elétricos, entre outros. Estes motores de combustão interna podem ser divididas em alternativas (motores com pistão) e rotativas (motores wankel), (Martins, 2004).

Esta tecnologia é amplamente aplicada para processos de geração de potência, setor de transporte, e para a produção de eletricidade. No último caso, estes equipamentos acoplados ao gerador são utilizados como fonte acionamento reserva, como no caso de edificações para o a iluminação mínima, movimentação de elevadores e plataformas entre outras aplicações. Porém, também são utilizados na geração de energia elétrica de meio e grande porte em instalações de cogeração/trigeração, onde além da eletricidade produzida, são reaproveitados seus gases de exaustão para a produção de calor que será processado para o acionamento de caldeiras de recuperação, *chiller* de absorção e adsorção, entre outros.

Estes motores de combustão interna utilizam uma variedade ampla de combustíveis, líquidos e gasosos, como fonte de acionamento. Em comparação às turbinas a gás, estes equipamentos possuem um custo inicial menor, e além de ter uma operação mais simples que as turbinas, os que os torna, apropriados para aplicações de cogeração no setor residencial e comercial, assim como para cargas industriais pequenas (Iza *et al.* 2017).

Geralmente, os motores de combustão interna do tipo alternativo, são classificados segundo o método de ignição do combustível: ignição por centelha - ciclo Otto e ignição por compressão - ciclo Diesel (Martins, 2004). Para a produção de potências de pequeno porte, os motores de ignição por centelha são comumente utilizados em aplicações de cogeração, utilizando gás natural, propano, gasolina, ou biogás como fonte de acionamento. Para a produção de potência elétrica de maior porte, os motores tipo diesel são mais apropriados, mesmo que também possam ser utilizados para a produção de pequeno porte. O combustível de acionamento é basicamente, o diesel, óleo pesado e/ou Biodiesel, e até a utilização de gás natural, através da configuração do motor.

3.2.2 Turbinas a Gás

As turbinas a gás são as tecnologias mais extensas para a cogeração em larga escala, devido a sua tecnologia já muito bem estabelecida e a quantidade de calor que pode ser aproveitada. Normalmente, a capacidade de geração distribuída varia de 500 kW a 50 MW e para usinas de cogeração centralizada para produção elétrica de até 250 MW. E as microturbinas podem ir de 30 a 100 kW. A eficiência das turbinas a gás é mais sensível às condições ambientais em relação aos motores de combustão interna. Quando a temperatura ambiente aumenta a densidade do ar diminui reduzindo o fluxo mássico através da turbina a gás e a potência líquida obtida no equipamento. A Figura 17 mostra uma microturbina a gás

capstone C30. Esta microturbina pode ser utilizada em microcogeração ou geração distribuída.

Figura 17 - Microturbina Capstone C30



Fonte: CAPSTONE (2016).

3.2.3 Sistemas de condicionamento de ar

Os sistemas de condicionamento de ar são equipamentos utilizados para reduzir a temperatura de ambientes internos para o conforto térmico. Estes sistemas são utilizados em edifícios públicos e privados, colégios, centros comerciais, hospitais, entre outros. Estes sistemas podem utilizar a eletricidade para seu acionamento (*chillers* de compressão a vapor) ou calor (*chillers* por absorção).

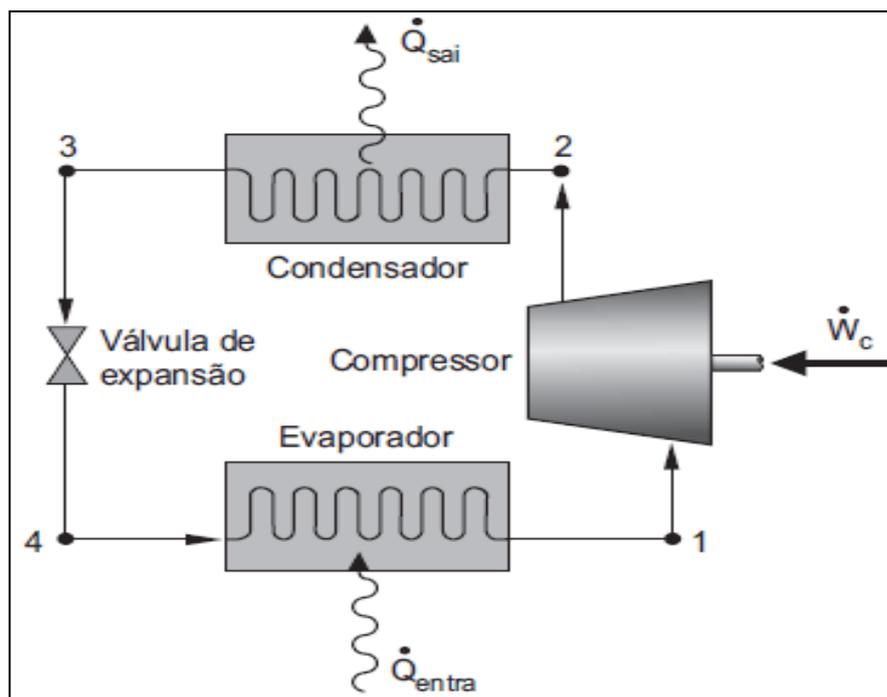
3.2.3.1 Chiller de compressão a vapor

Os sistemas de refrigeração por compressão mecânica de vapor, Figura 18, consistem basicamente em quatro processos fundamentais, tais como; condensação, evaporação, compressão e expansão. A eficiência de um ciclo é medida através do seu coeficiente de performance, COP, que é a razão entre o calor útil (resfriamento nesse caso) e a energia gasta pelo ciclo, que na Figura 18 é o trabalho do compressor.

No caso do ciclo ideal de refrigeração, estes processos são necessários para a produção de frio, através da utilização de um fluido refrigerante, que pode ser sintético ou natural, ou uma mistura (*Blend*), no qual este fluido é comprimido pelo compressor mecânico, elevando sua pressão e, portanto sua temperatura, após desta compressão o fluido refrigerante passa por um processo de transferência de calor (calor sensível e latente), onde o fluido através da liberação de calor ao ambiente, muda de fase (condensação do fluido refrigerante), o qual passará por uma expansão brusca através de um dispositivo de expansão para diminuir a

temperatura e pressão, deixando o fluido refrigerante do estado de quase líquido, e ao passar pelo evaporador, ocorre a mudança de fase, produzindo o efeito frio, capacidade de refrigeração que será utilizado para remover o carga térmica de um local específico seja para o conforto térmico ou refrigeração de produtos (resfriados e congelados). Este fluido refrigerante na forma de vapor passa novamente pelo compressor para iniciar o ciclo.

Figura 18 - Ciclo de refrigeração por compressão mecânica.



Fonte: MORAN; SHAPIRO (2006).

Estes equipamentos podem ser utilizados para à conservação de produtos (conservação e congelamentos de alimentos), assim como também, para processos de climatização (conforto térmico), o qual está fortemente ligado aos processos de qualidade de ar interior. Portanto, a ênfase de analisar o conforto térmico e a qualidade do ar como processos simultâneos de operação. Relacionado o conforto térmico e a qualidade do ar interior, a literatura mostra uma ampla gama de trabalhos neste sentido, (Matzarakis, 2017; Yu *et al.*, 2018a e 2018b), com o intuito de verificar a relação dos parâmetros de temperatura e umidade interna com a preservação das condições ótimas de concentrações de componentes do ar interno.

Estes equipamentos são muito utilizados em centrais de água gelada, Figura 19, tais como; shopping centers, onde os sistemas são utilizados para a produção de água gelada no circuito primário, e depois a água gelada é enviada para os diferentes locais a resfriar o ar, através do circuito secundário.

Figura 19 - Chiller por compressão a vapor para gelar água.

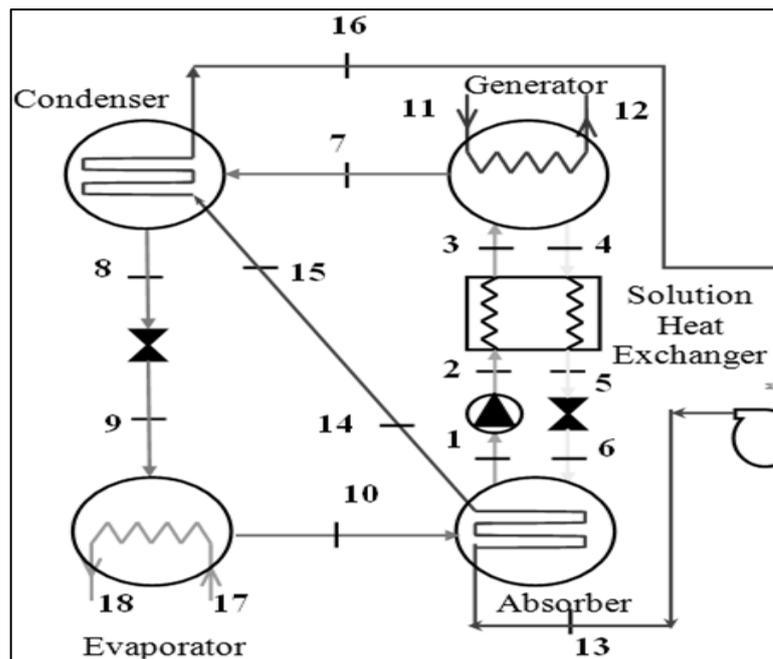


Fonte: CARRIER (2019).

3.2.3.2 Chiller de absorção

Os sistemas de refrigeração por absorção ou simplesmente *chiller* de absorção, Figura 20, são máquinas de refrigeração semelhantes aos *chillers* de compressão a vapor, com a única diferença no compressor utilizado, o qual é substituído, por um compressor térmico.

Figura 20 – Esquema simples do ciclo de refrigeração por absorção.



Fonte: OCHOA *et al.* (2016).

Este *chiller* de absorção são acionados de forma direta, através da queima de um combustível, ou de forma indireta, através da reutilização de rejeitos térmicos de outros processos (Ochoa *et al.*, 2011, 2014, 2016). Estes sistemas são constituídos basicamente, pelo dessorvedor ou gerador, absorvedor, condensador, válvulas de expansão, evaporador, bomba de circulação, e trocadores de calor intermediários. São classificados em sistemas de simples efeitos, quando a solução é aquecida exclusivamente uma vez, e de múltiplos efeitos, quando a solução é aquecida várias vezes para a produção de vapor refrigerante. Comercialmente, os pares de solução que utilizam estes equipamentos são; brometo de lítio e água, e amônia e água, sendo a primeira solução utilizada para processos de conforto térmico, e a última solução, para processos de refrigeração e conforto térmico (Ochoa *et al.*, 2011). Sua principal vantagem é o acionamento a partir de rejeitos térmicos, ou que possibilita a poligeração como configuração ideal (Cavalcante *et al.* 2017), porém como desvantagem, o alto custo e baixo coeficiente de desempenho, quando comparados aos sistemas convencionais de compressão a vapor.

O funcionamento de um *chiller* de absorção inicia o processo de refrigeração com o fornecimento de calor no gerador, onde se encontra a solução binária ou ternária. O fluido refrigerante dentro da solução evapora, enquanto o absorvente em alta concentração permanece líquido, através de um processo conhecido como dessorção. O vapor de refrigerante flui para o condensador, onde o calor é dissipado, condensando o vapor refrigerante. Este refrigerante líquido, com alta pressão passa através do dispositivo de expansão, reduzindo sua pressão e, portanto, a temperatura que entra no evaporador, onde ocorre a efeito frigorífico, através da vaporização do refrigerante. O vapor refrigerante a baixa pressão escoar até o absorvedor, onde, devido à afinidade química dos componentes da solução e à dissipação de calor, condensa a diluição do absorvente concentrado proveniente do gerador. A solução diluída (com alta concentração de refrigerante) é bombeada ao gerador, onde o refrigerante, novamente, fechando o ciclo. Comumente, utiliza-se um trocador de calor intermediário, entre o gerador e o absorvedor para elevar o COP do *chiller*. Nesse equipamento a solução forte em refrigerante que retorna ao gerador é pré-aquecida com o calor da solução fraca em refrigerante que retorna ao absorvedor.

A rejeição de calor do absorvedor e condensador acontece por meio de resfriamento à água (torres de resfriamento ou aeradores) ou ar (dissipação em seco com o ar).

3.2.4 Caldeiras de Recuperação

Como parte fundamental toda indústria, e especificamente em plantas de geração de energia, a produção de vapor está vinculada às caldeiras e geradores de vapor, Figura 21. As caldeiras são o coração de ciclo de vapor e ciclos combinados, onde, este componente, produz vapor para o acionamento de outro componente, neste caso, turbina.

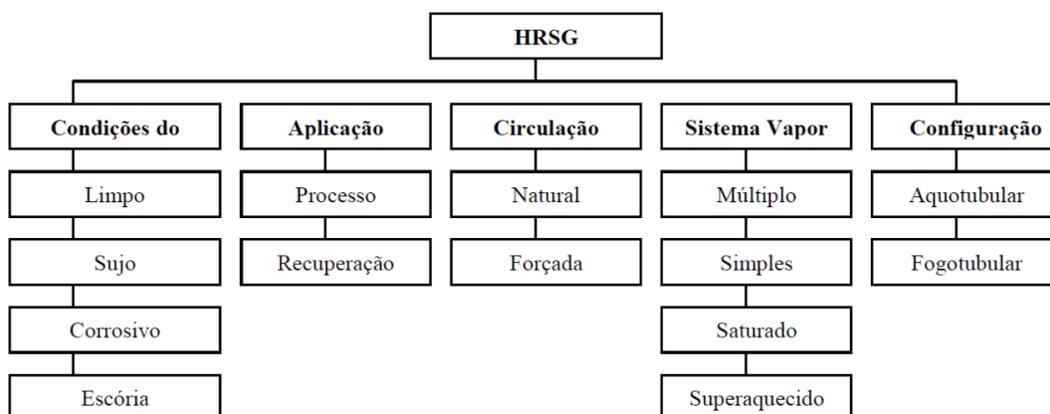
Figura 21 - Caldeira de recuperação de uma planta de celulose.



Fonte: ISQ BRASIL (2014).

As caldeiras de recuperação térmica ou *Heat recovery steam generator* (HRSG) podem ser classificadas segundo: as condições de operação, aplicação, circulação de vapor, sistema a vapor e configuração. A Figura 22 mostra o esquema de classificação das caldeiras de recuperação.

Figura 22 - Classificação das caldeiras de recuperação térmica.



Fonte: GOMES (2005).

Existe uma grande variedade de caldeiras de recuperação, desde as que funcionam segundo o ciclo sem reaquecimento e pressão única, até os de ciclo com reaquecimento simples/múltiplo e tripla pressão. A classificação das caldeiras de recuperação pode ser feita de acordo com a sua aplicação, configuração, tipos de circulação, condições do gás e quanto às superfícies de aquecimento. Gomes (2005) pontua que a principal classificação das caldeiras, compreende basicamente duas grandes categorias. A primeira categoria é das caldeiras de recuperação destinadas a resfriar uma corrente de gás a uma faixa de temperatura, por considerações de processo. Neste caso a energia recuperada tem caráter secundário enquanto a temperatura de saída, parâmetro de extrema importância, deve ser controlada de forma a não afetar as reações de processos a jusante da caldeira. Esse tipo de caldeira pode ser encontrado na indústria química, plantas de hidrogênio e ácido sulfúrico. Na outra categoria tem-se as caldeiras de recuperação destinadas a maximizar a energia recuperada. Este caso evidencia a importância de se resfriar a corrente de gás tanto quanto possível, atendo-se a restrições referentes à temperatura dos gases, evitando problemas de corrosão. Estas caldeiras são utilizadas em plantas de ciclo combinado e sistemas de cogeração.

3.2.5 Torres de Resfriamento

Torres de resfriamento são equipamentos que usam o princípio do resfriamento evaporativo para retirarem calor do processo. Numa torre de resfriamento, a água goteja sobre uma superfície por onde escoar ar. Através de processos de transferência de calor e massa, parte da água que escoar pela superfície evapora e passa a fazer parte do fluxo de ar, que se torna mais úmido e tem sua temperatura elevada. A água remanescente, com temperatura mais baixa, é coletada na base da torre. As torres de resfriamento conseguem melhores resultados de resfriamento do que equipamentos que utilizam o ar, devido ao limite teórico do resfriamento não ser a temperatura de bulbo seco do ar e sim a temperatura de bulbo úmido, que é em geral menor que a temperatura do ar. Devido ao próprio processo de troca de calor, a água utilizada em uma torre de resfriamento sofre evaporação (cerca de 2%) e o restante da água pode retornar ao processo industrial, economizando assim água e preservando o meio ambiente. A Figura 23 mostra a utilização de torres da ALPINA em uma termoeletrica brasileira.

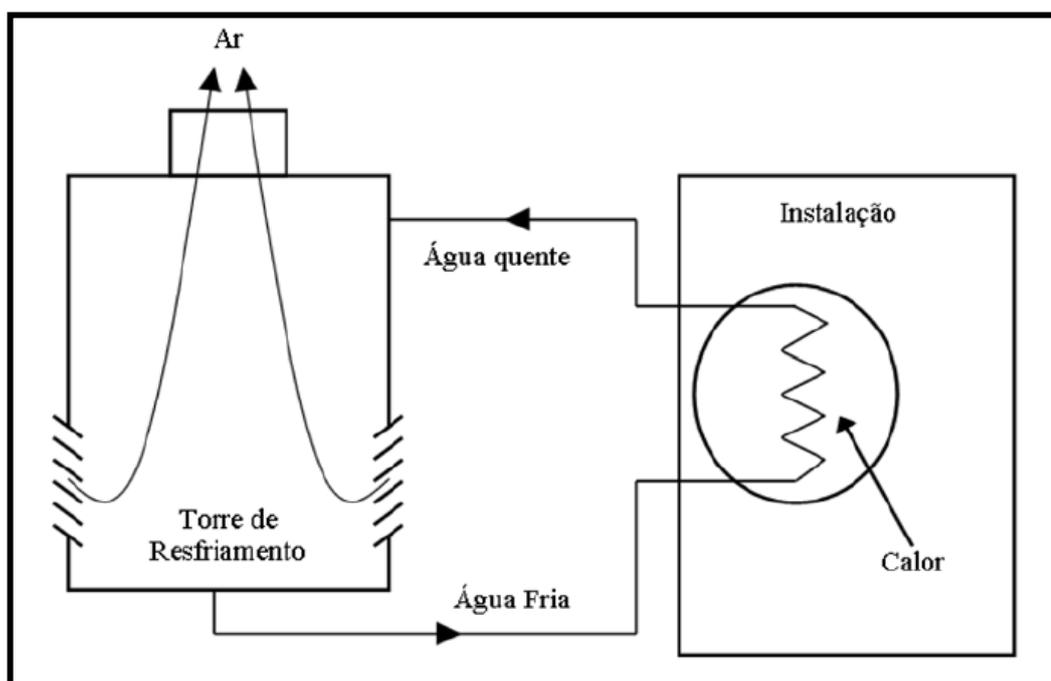
Figura 23 - Torre de Resfriamento Alpina instalada numa Termoelétrica Brasileira.



Fonte: ALPINA (2006).

A Figura 24 mostra um esquema do funcionamento de uma torre de resfriamento. A água entra no processo para retirar calor, ganhando calor sensível e, portanto, aumentando sua temperatura, onde é transportada para a torre através de bombas e aspergida de encontro com uma corrente de ar contrária, onde acontece uma troca de calor e massa entre o ar frio e a água quente, onde parte desta água evapora indo para atmosfera e baixando a temperatura da água restante, que é recolhida em uma bacia coletora e por fim enviada de volta para o processo.

Figura 24 – Instalação com torre de resfriamento.



Fonte: PIRANI; VENTURINI (2004).

As torres de resfriamento são classificadas de acordo com a forma de movimentação do ar através dela. São classificadas em:

- a) Torres de tiragem natural;
- b) Torres de tiragem mecânica com corrente de ar induzida;
- c) Torres de tiragem mecânica com corrente de ar forçado.

3.3 DEMANDA ENERGÉTICA

Os sistemas de trigerção têm por objetivo atender as demandas energéticas nos mais variados setores, como industrial ou residencial. As demandas são caracterizadas pela necessidade de cada setor. Por exemplo, em hospitais há necessidade 24h de energia elétrica para equipamentos de UTI, por exemplo, que não podem ser desligados em hipótese alguma. Também há necessidade de calor para lavanderia e esterilização de instrumentos. Na indústria de processos, como fábrica de bebidas, têxtil, química, farmacêutica etc., grande quantidade de calor e/ou frio é necessário na fabricação dos produtos. Em edifícios, no inverno há necessidade de calefação, no verão, climatização, ademais há também consumo de energia elétrica por parte de equipamentos de escritório, cozinha, copa, entre outros. Suprir corretamente a demanda energética está diretamente ligado ao sucesso ou fracasso do empreendimento. E para que a demanda seja bem suprida, o conhecimento de suas características é fundamental. Conhecer o seu comportamento hora a hora, quais são as necessidades de cada tipo de energia em todos os períodos do ano são essenciais para uma completa caracterização de demanda energética. Esse conhecimento pode auxiliar na busca por formas sustentáveis de oferta de energia. E a busca por menores índices de poluição está presente em todos os setores, inclusive nos edifícios.

A princípio, é importante coletar o máximo de informação relevante como: o atendimento da demanda deve ser contínuo ou intermitente? Quais são os dias de maior consumo? Que tipo de energia é a mais demandada? Em qual horário está a maior e a menor demanda de energia? Média de temperatura anual local? Umidade relativa do ambiente? Qual o preço da energia elétrica? Combustíveis disponíveis? Preço dos insumos e equipamentos etc. Mas nem sempre estas informações estão disponíveis, ou até não existem dados confiáveis. Para edifícios residenciais, ou onde a ocupação pode variar, não é tão simples a sua caracterização, diferentemente de indústria ou comércio, onde as demandas são constantes e bem caracterizadas. Às vezes é necessário fazer uma estimativa. Há basicamente duas metodologias que são utilizadas na caracterização de demanda de edifícios, a *top-down* ou a *bottom-up*. Os modelos *top-down* tratam o setor residencial e as demandas de energia sem

distinguir o consumo de energia devido a usos finais individuais. Variáveis típicas para modelos *top-down* são indicadores macroeconômicos (produto interno bruto, taxas de emprego, preços), condições climáticas, estimativas de eletrodomésticos por residência. Os modelos *bottom-up* calculam o consumo de energia do indivíduo ou de um grupo de casas e, em seguida, extrapolam esses resultados para representar uma região ou país, os dados típicos de entrada desses modelos são as propriedades da habitação (geometria, tecido de envelope) propriedades do clima, como temperatura e umidade, além de horários de ocupação e uso de equipamentos. Nesta tese foi utilizado o modelo *bottom-up*, baseado em dados históricos obtidos através de pesquisa.

O modelo *bottom-up* é dividido em dois tipos: modelo estatístico e modelo de engenharia. O primeiro é baseado em contas e consumos, através dos quais são aplicados alguns tipos análises de regressão com base nos históricos de informações. O segundo é baseado nas potências, uso de equipamento e sistemas e / ou transferência de calor e relações termodinâmicas. No caso deste trabalho, foram utilizadas as duas abordagens, tanto foram utilizadas dadas de consumo de energia elétrica, quanto dados de equipamentos e equações termodinâmicas. Há muito métodos para estimar as cargas energéticas, como (Chung e Park, 2015): análise estatística, regressão espacial, base variável grau-dia (VDD), algoritmo genético e classificação climática.

Na análise estatística, informações sobre consumo de energia do objeto de estudo deve ser consultado através de sua documentação e outras informações também devem ser levadas em conta, como informações sobre construção, tipo de climatização, tipo de processo, tecnologia adotada, etc. A coleta de uma grande quantidade de informações pode ser longa e também custar muito tempo para selecionar informação relevante, porém isso é necessário para melhor caracterizar a demanda, haja vista nem toda informação que é necessária estará disponível. Logo, hipóteses baseadas em informações secundárias podem ser bastante úteis. Por exemplo, em Wei *et al.* (2015), foram analisados 45 edifícios em *Changsha* (China) e cinco conceitos foram levados em consideração: área contida na parte interna dos edifícios, tipo de climatização e função dos edifícios, consumo anual de potência por metro quadrado, consumo anual de energia por metro quadrado, tipo de fonte primária. E o perfil da demanda foi definido a partir de regressão linear e distribuição normal dos consumos de energia e potência.

Em áreas urbanas, por exemplo, a energia usada pelos edifícios está distribuída espacialmente. É possível analisar esta distribuição através da ferramenta de regressão espacial. Tian *et al.* (2012) usaram regressão espacial para determinar o padrão de consumo

de gás em edifícios não domésticos em Londres. O conceito chave em regressão espacial é a autocorreção, ou seja, quais são as variáveis que estão associadas com as diferentes localizações da cidade.

Há estudos que se baseiam em características construtivas de edifícios para determinação da demanda energética, outros nas características espaciais urbanas, outros no consumo de energia primária. Porém, há outro método bastante utilizado, que é a Base variável grau-dia (VDD). Este método é baseado em uma função de resposta da variação de temperatura. Onde, Grau-dia é definido como a diferença entre a temperatura média do dia e uma temperatura de referência.

$$HDD_T = \sum_{dia}^t (T - T_{b,h}), \text{ quando } T \geq T_{b,h} \quad (1)$$

$$CDD_T = \sum_{dia}^t (T_{b,c} - T), \text{ quando } T \geq T_{b,c} \quad (2)$$

Onde, T é a temperatura média diária, $T_{b,h}$ e $T_{b,c}$ são as temperaturas de equilíbrio para calor e frio respectivamente.

No setor comercial, espaços onde a temperatura é controlada são menos ajustados do que em residências. Em residências a demanda energética sofre grande influência das mudanças climáticas. Devido à importância de temperatura no padrão energético no setor residencial, entender a relação temperatura-demanda torna-se um ponto chave no gerenciamento de energia em zonas urbanas.

O Algoritmo genético é uma ferramenta de busca estocástica e otimização baseada nos princípios da evolução natural. A vantagem deste método é que pode ser utilizado para variáveis discretas ou contínuas, problemas lineares e não lineares, diferenciáveis ou não. O Algoritmo genético usa uma codificação de parâmetros, agrupados, como se fosse um cromossomo. E cada cromossomo desses, representa uma possível solução. O método trabalha com população de possíveis soluções e não com um ponto. Inicialmente uma população é escolhida aleatoriamente e avaliada segundo uma função potencial. As soluções são classificadas, e a partir desta classificação, uma nova população é obtida através de reprodução, cruzamento e mutações. A seguir os resultados são novamente avaliados, classificados, até que sejam encontradas as melhores soluções para o determinado problema.

A facilidade de sua aplicação tem permitido que essa técnica seja utilizada para identificação de solução de negócios, otimização científica e problemas de engenharia. No

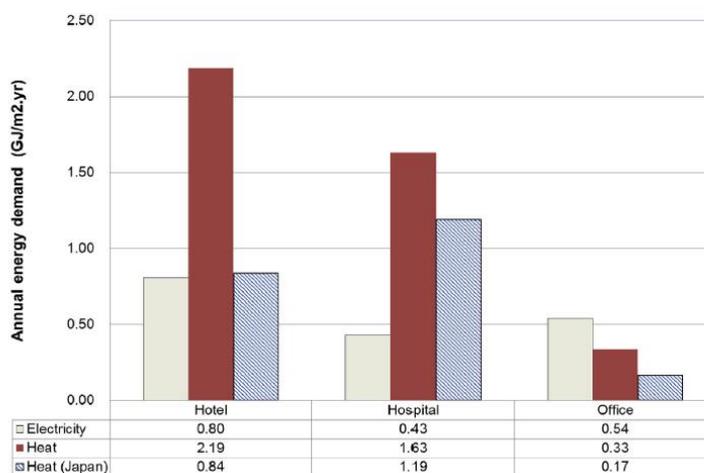
problema de determinação de parâmetros de modelo de previsão, algoritmo genético também tem sido utilizado (Ng *et al.* (2008)).

Lee e Kung (2011) usaram análise de grupos para classificar edifícios de Taiwan em termos climáticos. Após isso, fizeram uma análise de regressão para calcular fatores de escala, como área e número de ocupantes, para calcular o consumo de energia dos edifícios. Depois, uma ferramenta de análise de dados toma os fatores de escala como dados de saída e o consumo energético como dado de entrada para calcular os rendimentos dos edifícios. Para que isto fosse realizado, foi necessária uma coleta significativa de dados de edifícios empresariais em Taiwan.

Outra forma de conhecer a demanda é através da modelagem de carga energética. Há muitos problemas para modelar cargas energéticas. Para edifícios, por exemplo, mudança de clima, ocupação e o tempo. Muito esforço é necessário para desenvolver um modelo de cargas, porque há muitas variáveis complexas envolvidas. E nem sempre o setor tem sua demanda bem caracterizada, assim surge à necessidade de escolher o método que mais se aproxime da realidade de cada caso. Porque mesmo dentro de um setor, como edifícios, por exemplo, onde há diferentes tipos de utilização, há distintas demandas e consumos. Como pode ser observado na Figura 25.

Energia é uma preocupação geral e global. Setores como indústria e comércio, estão em busca do aprimoramento de práticas energéticas e tem aumentados seus esforços em comissionamento, estratégias de gerenciamento, otimização de operacional, bem como implementação de tecnologias de controle e informação. Para atingir melhores rendimentos técnicos, financeiros e ambientais.

Figura 25 – Consumo de energia médio anual.



Fonte: CHUNG; PARK (2015).

A principal característica da demanda energética de edifícios (residencial ou do setor terciário) é a alta variação em função de mudanças climáticas e da ocupação do edifício. A demanda é um dos mais importantes dados de entrada em modelos de otimização e deve ser estimado antes do modelo de otimização do sistema de suprimento de energia. Porém todos os métodos já discutidos são baseados em informações de históricos e usam algum tipo de regressão para relacionar dados de entrada e saída. Porém, há ferramentas de simulação que não necessitam de uma base histórica de consumo de energia. Ferramentas de simulação desse tipo são DOE-2, *EnergyPlus*, *TRNSYS* e *DesignBuilder*.

3.3.1 Dias característicos

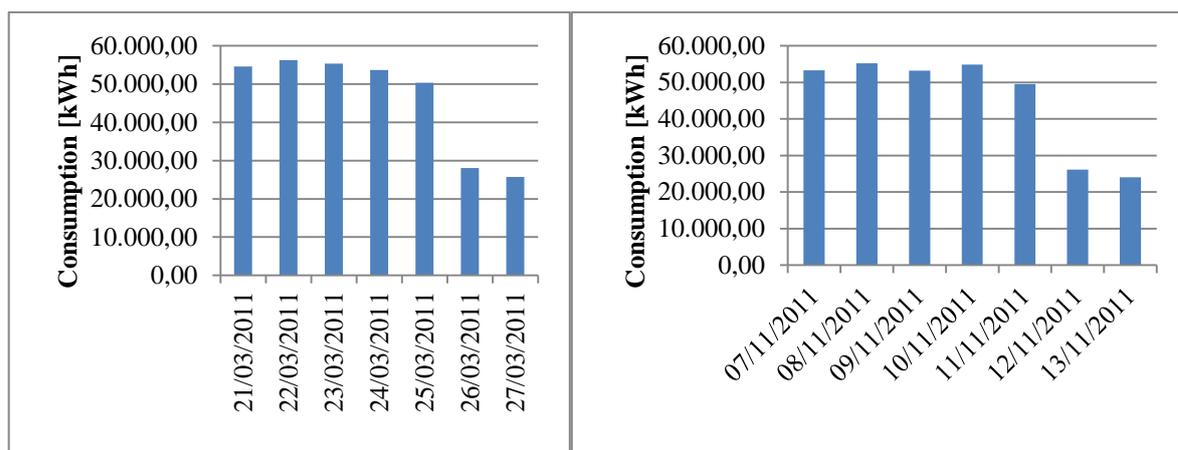
Devido ao grande número de variáveis envolvidas na otimização do uso dos recursos energéticos e ao grande número de possibilidades de atender uma demanda energética, métodos de otimização podem ser bastante úteis na escolha da melhor configuração de equipamentos e na forma de operação destes equipamentos. Porém, sistemas muito detalhados necessitam de métodos mais sofisticados para resolução do problema. Uma dificuldade que pode ser encontrada é a quantidade de tempo para que o sistema seja resolvido. Por exemplo, se o consumo energético de um edifício for tomado minuto a minuto durante um ano. Isso geraria uma quantidade de dados onde seria gasto muito tempo para analisar e otimizar.

Para a trigeriação é importante que haja o conhecimento desse comportamento do consumo energético horário (Jordi *et al.*, 2011). Porém, para diminuir a complexidade do problema e reduzir o tempo computacional, é possível utilizar dias que representem a maioria dos dias do ano, esses dias são conhecidos como dias típicos. Em Magnani *et al.*, 2012, foram selecionados 12 dias típicos num período de um ano para representar a demanda térmica e elétrica de um edifício comercial no nordeste brasileiro. Jordi *et al.*, 2011 propuseram um método de seleção de dias típicos de uma demanda energética para um ano e analisaram as influências dos resultados em um modelo de otimização para uma trigeriação. Beihong e Weiding, 2006, consideraram um dia típico para cada mês do ano. O dado de entrada para cada dia típico é a demanda energética horária. O objetivo deste trabalho é desenvolver um planejamento ótimo para determinar o tamanho dos equipamentos de uma planta de cogeração e as estratégias de operação. Piacentino e Cardona, 2008 abordam o uso de uma ferramenta computacional que permite fazer otimização com múltiplos objetivos. A simulação foi feita para dois grandes edifícios e foi observada qual a influência da quantidade de dias típicos usados em outros parâmetros como o tamanho dos equipamentos de cogeração, o valor presente líquido, economia de energia primária, emissão de dióxido de carbono e o tempo

computacional gasto para simulação. Seo *et al.*, 2008, mediram o consumo de eletricidade e combustível de casas na Coreia do Sul. A partir desses dados escolheram um dia típico para cada mês. Estes dias típicos foram utilizados na escolha do tamanho de unidades de cogeração que iriam atender as demandas de eletricidade e calor das casas. O sistema de cogeração, quando operando em condições ótimas, pode economizar mais de 30% do combustível que seria usado sem a cogeração. Chicco e Mancarella, 2009 apresentam uma matriz para modelar sistemas de trigeração de pequena escala. Neste trabalho foram levados em consideração três dias típicos para caracterizar a demanda de energia e os preços dos insumos, um dia de verão, um de inverno e um intermediário.

Na Figura 26 pode se observar o consumo energético da Universidade Federal da Paraíba (UFPB) em duas datas distintas. O consumo médio semanal é similar tanto no outono, quanto na primavera. A média durante os dias úteis é maior do que no final de semana.

Figura 26 – Consumo elétrico de duas semanas típicas na UFPB



Fonte: O AUTOR (2011).

Para a indústria, por exemplo, a demanda energética é mais constante. Então, é possível considerar períodos maiores, como uma semana ou um mês, para que seja feita uma análise energética. Já para residências, é mais interessante usar uma base horária para aquisição de dados.

3.3.2 Configurações do sistema energético

A cogeração pode ser uma ferramenta poderosa para aumentar a eficiência acima de 80% na conversão de energia, comparada com 30 a 35% dos sistemas convencionais de geração de energia elétrica a partir de combustíveis fósseis. Outra vantagem de usar sistemas

de cogeração é a redução da emissão de gases poluentes. Sistemas de cogeração podem ser usados em hospitais, hotéis, residências, indústrias e edifícios comerciais.

Para geração de eletricidade e calor há quatro tipos de tecnologias que são mais utilizadas:

- a) Motores geradores (MG);
- b) Micro turbina (MT);
- c) Célula combustível (CC);
- d) Motores *Stirling* (MS).

Os dois primeiros tipos de tecnologias são os mais utilizados para cogeração, devido ao custo de investimento e manutenção mais baixos. Motores geradores têm eficiência elétrica maior do que turbinas a gás de mesma potência. Mas também possui limitações como frequente manutenção, vibração, barulho e emissão de poluentes. Microturbinas tem um maior potencial térmico, resposta mais rápida, pesam menos, fazem menos barulho e tem menor custo de manutenção. Porém, tem um custo de investimento maior do que os motores geradores. As células combustíveis são a melhor opção do ponto de vista ambiental. Além disso, possuem rendimento elétrico mais alto do que as outras tecnologias. Porém, tem tempo de vida menor e o custo comparado às outras tecnologias é mais alto (Onovwionaa e Ugursal, 2006).

Outra demanda que pode ocorrer em edifícios é de água quente. Um equipamento que usa o princípio da absorção é a bomba de calor de absorção de gás. Esse equipamento pode substituir as caldeiras convencionais e possuem a vantagem de emitirem menos calor a gás do mesmo porte disponíveis no mercado.

Fontes de energias renováveis também podem ser utilizadas como fonte de calor e geradores de eletricidade. Para obter água quente, uma tecnologia já bastante difundida são as placas solares. As placas solares podem ser usadas para atingir baixas, médias e altas temperaturas. Isso vai depender da razão de concentração do coletor. Baixas temperaturas (50 a 150°C) são mais usadas em aplicações em residências, médias temperaturas (150 a 500°C) são usadas como fonte de calor para *chillers* de absorção e altas temperaturas (1000 a 3000°C) são usadas em *chillers* de absorção e para geração de eletricidade em plantas solares.

Como opção para geração de energia elétrica a partir de uma fonte renovável, há também as células fotovoltaicas. Células fotovoltaicas se baseiam no princípio de conversão direta de luz solar em eletricidade.

Para geração de frio há três tipos de tecnologias que são mais utilizadas:

- a) Refrigeração por absorção;
- b) Refrigeração por dissecantes;
- c) Refrigeração por ejeção de vapor.

Tem aumentado o interesse na tecnologia de refrigeração por absorção. Devido ao potencial que esta tecnologia proporciona, pois é possível utilizar calor residual de algum processo, ou fontes renováveis de energia. Um equipamento que é utilizado para essa operação é chamado *chiller* de absorção. Esse equipamento é projetado com base em várias opções de configurações ciclos com o objetivo de atender diferentes condições e aplicações.

3.3.3 Seleção do indicador

Geralmente a análise de sistemas de geração de energia é baseada na redução de custos, sem medir outros tipos de impactos como sociais e ambientais (Mago e Chamra, 2009). Mas a tendência mundial de grande migração para as cidades tem aumentando vários problemas de sustentabilidade. Visando a viabilidade de grandes metrópoles, em longo prazo, formuladores de políticas estão de olho nos impactos socioambientais causados pelo desenvolvimento econômico. Alto consumo de energia e emissão de gases poluentes está entre as preocupações.

A escolha de um índice deve ser baseada num contexto local, nas políticas, nos dados disponíveis. Em Chong *et al.*, 2016 são apresentados os principais indicadores de sustentabilidade, Tabela 1. Os indicadores são utilizados como parâmetros de tomadas de decisão nos diferentes tipos de projetos. No caso de projetos de sistemas de poligeração há uma grande gama de possibilidade de índices, essa escolha será baseada nas metas a serem atingidas pelo sistema, metas ambientais, econômicas ou sociais.

Para sistemas de fornecimento de energia a métricas mais usadas são eficiência energética, valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR), tempo de retorno de investimento (SPB), emissão de CO₂, CO₂ equivalente. Incluso há normas que abordam temas de eficiência energética, a fim de buscar a redução da emissão de poluentes na atmosfera e de custos, como a ISO 50.001. Há também normas que apontam na direção socioambiental, como a ISO 26.000, que trata de responsabilidade social para as organizações, buscando um desenvolvimento sustentável da sociedade em consonância com as leis e normas de responsabilidade internacionais.

Tabela 1 – Indicadores de sustentabilidade.

Indicadores de Sustentabilidades		
Ambiental	Econômico	Social
Emissão de ar, emissão de terra, emissão de esgoto, pegada ecológica, impacto visual local, emissão de CO2 deslocado, custo externo total de transporte rodoviário de resíduos.	Custo líquido por tonelada processada, custo de transferência de estação e transporte rodoviário de resíduos, maturidade técnica, valor estratégico e de flexibilidade.	Impacto do tráfego de caminhões em comunidades locais, trabalhos criados, saúde da comunidade local, propriedade da comunidade.
Emissão de poluentes (Co2, VOC, So2, NoX, partículas, CH4), radioatividade, Demanda de Oxigênio Bioquímico (BOD), ruído.	Eficiência técnica, renovabilidade, demanda acima da capacidade de produção, possibilidade de crescimento de tecnologia, custo de produção.	Noção de bem público, área de terra requerida, tempo de retorno de pagamento da energia, número de pessoas trabalhando em cada tecnologia de energia, risco de oferta, uso dos recursos energéticos locais.
Potencial de aquecimento global, potencial de acidificação, potencial de eutrofização, consumo de combustíveis fósseis.	Custo de investimento, custo de operação, custo de manutenção, custo ambiental	Ocupação de terra, perigo a saúde humana, oportunidade de emprego.

Fonte: CHONG *et al.* (2016).

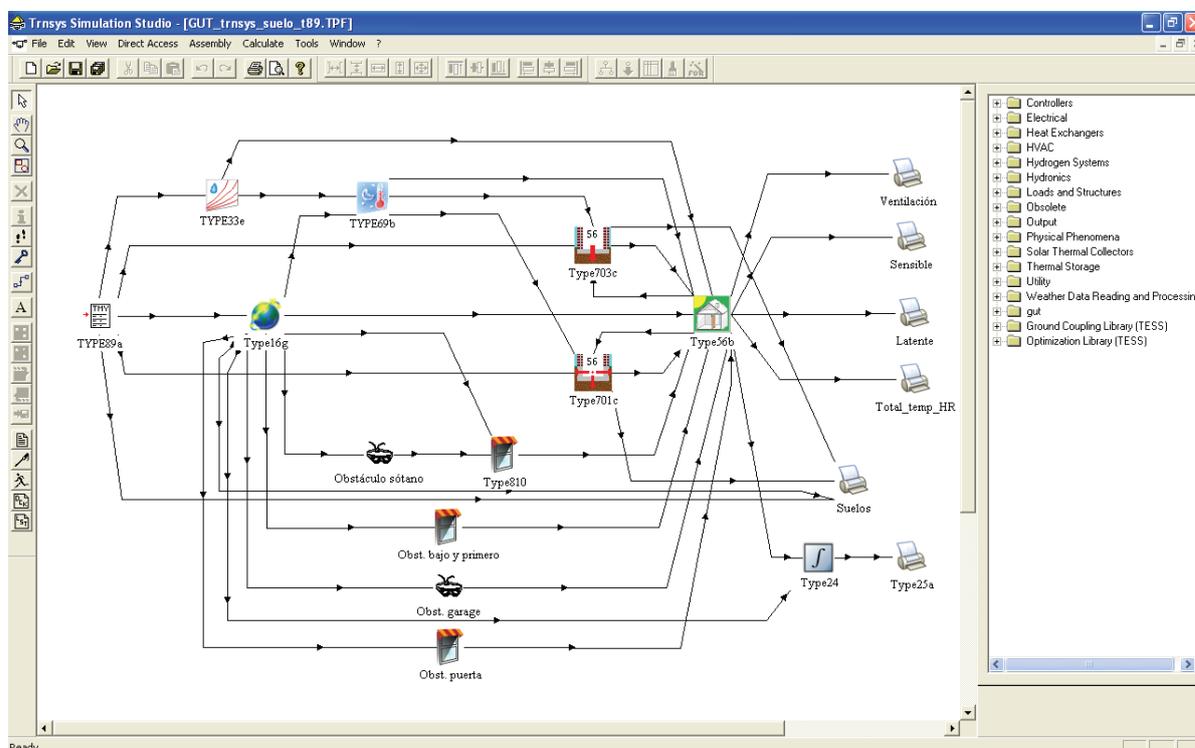
3.4 PLATAFORMAS COMPUTACIONAIS UTILIZADOS NO DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DE SISTEMAS DE POLIGERAÇÃO

Aqui temos uma das áreas mais importantes do trabalho, a área de simulação. Ferramentas computacionais como o TRNSYS e Design Builder são utilizados em simulações nas áreas de engenharia de energia renovável e simulação de construção para projetos de energias limpas.

3.4.1 TRNSYS

TRNSYS é uma ferramenta de simulação transitória com uma estrutura modular aberta que simula os setores de eletricidade, aquecimento e resfriamento de um sistema de energia. Esta ferramenta é usada principalmente nas áreas de engenharia de energia renovável e simulação de edifícios para projetos solares passivos e ativos. TRNSYS é um pacote de software comercial desenvolvido na Universidade de *Wisconsin*. Cada componente do sistema de energia é representado por um TYPE (ou bloco) que pode ser conectado a outro TYPE para criar o sistema de energia, cada TYPE pode representar um equipamento, ou uma função, ou entrada e saída de dados. O TYPE56, por exemplo, é um modelo de construção multizona padrão que é circundado por outros componentes que lhe impõem condições de contorno. Estas condições referem-se às temperaturas das paredes em contato com o solo, condições meteorológicas, cálculo de radiação para as diferentes orientações das fachadas dos edifícios, modificadores dos termos de radiação devidos à presença de janelas suspensas ou obstáculos remotos, etc. A Figura 27 mostra uma captura de tela de um modelo de simulação usando o TYPE 56 (Bruno *et al.* 2006).

Figura 27 – Simulação de TRNSYS para edifícios usando o TYPE 56.

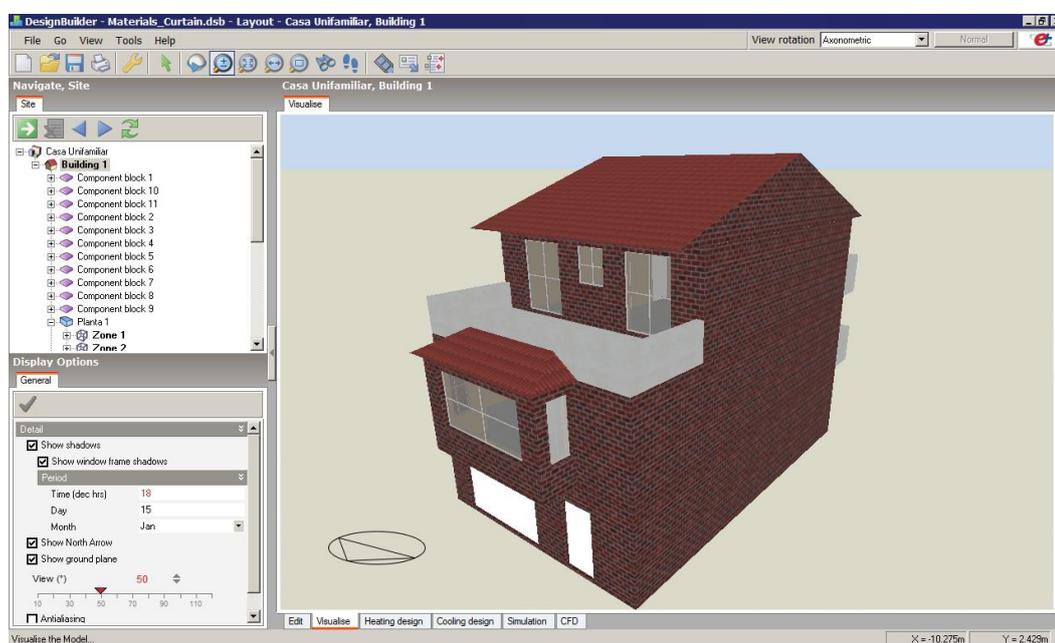


Fonte: BRUNO *et al.* (2006).

3.4.2 Design Builder Software

O *DesignBuilder* é um software pago de simulação térmica, que possibilita a introdução de dados referentes à geometria do edifício, materiais construtivos e características dos diversos sistemas de apoio, de modo a criar um modelo 3D do edifício a simular. A sua interface gráfica é simples e torna as simulações com este software mais intuitivas, até para utilizadores menos experientes. No entanto, é também possível explorar o programa a um nível mais avançado, através da modelação de edifícios com elementos construtivos mais complexos, como é o caso das fachadas de dupla camadas. O *DesignBuilder* permite simular construções complexas rapidamente até mesmo por usuários não especialistas, os modelos de construção são montados posicionando, esticando e cortando blocos em um espaço tridimensional, fornecendo feedback visual da espessura real do elemento e das áreas e volumes da sala. O *DesignBuilder* contém vários modelos de dados para carregar construções, atividades, sistemas de climatização e iluminação comuns no projeto. Além disso, modelos personalizados podem ser criados também. Uma captura de tela do *DesignBuilder* é apresentada na Figura 28.

Figura 28 – Foto da tela do Desingbuilder com uma casa renderizada.



Fonte: O AUTOR (2015).

O *DesignBuilder* foi especificamente desenvolvido em torno das capacidades de simulação do *EnergyPlus*. O *EnergyPlus* é um programa de modelação energética de edifícios desenvolvido para a simulação dos sistemas de aquecimento, arrefecimento, ventilação e

iluminação artificial. O *EnergyPlus* foi criado pelo Laboratório Nacional de Lawrence Berkeley (LBNL), por iniciativa do Departamento de Energia Norte-Americano (DOE) a partir de outros dois softwares e vem completamente integrado no *DesignBuilder*, tirando partido da qualidade da sua interface. Este programa baseia-se nas características geométricas e físicas do edifício e dos diferentes sistemas integrados para proceder ao cálculo das necessidades de aquecimento e arrefecimento que garantam o conforto dos ocupantes e para avaliar a performance energética do edifício. A fidelidade dos seus resultados e a grande variedade de dados de saída fazem do *EnergyPlus* um dos softwares de simulação de edifícios mais utilizados em todo o mundo, devido a sua eficiência e por ser livre.

3.5 PARÂMETROS FINANCEIROS APLICADOS A SISTEMAS DE POLIGERAÇÃO – VIABILIDADE ECONÔMICA

Parâmetros econômicos são utilizados para analisar e verificar a viabilidade financeira de projetos. Neste caso, projetos na área de energia, visando o acoplamento de dados técnicos de usinas geradoras de energia e/ou outros produtos e com o investimento inicial, custos associados, receitas e impostos que permitam encontrar indicadores reais no tempo para a toma de decisão da execução e/ou substituição (PUCCINI, 2012).

A engenharia econômica é o ramo da economia aplicada aos projetos de engenharia para analisar a mudança de o valor monetário no transcorrer do tempo, portanto, a necessidade de utilização de parâmetros econômicos que permitem avaliar e comparar o valor temporal do dinheiro (Hirschfeld, 2007). Consequentemente, é possível executar uma avaliação de viabilidade econômica de qualquer projeto de poligeração (produção simultânea de eletricidade, frio e calor) em função dos custos e receitas, que leve à redução de fontes primárias de energia e também redução de emissão de poluentes, e principalmente, que gere lucros, ou seja, benefícios positivos aos investidores.

A aplicação de avaliações econômicas em plantas de poligeração vem sendo aplicada ao longo dos anos, como ferramenta auxiliar a análise de primeira e segunda Lei da termodinâmica, assim como pode ser visualizada na literatura (Ochoa *et al.*, 2016; Jin *et al.*, 2019; Cavalcanti *et al.*, 2019).

Neste sentido, três indicadores financeiros são comumente utilizados para estas avaliações; valor presente líquido, Taxa interna de retorno, Tempo de retorno do capital (Payback).

3.5.1 Valor presente líquido (VPL)

Este indicador, chamado de valor presente líquido representa a diferença entre o valor presente de fluxo de caixa do projeto em estudo e seu custo inicial. O fluxo de caixa é dado pelo somatório dos valores presentes das entradas menos o somatório dos valores presentes das saídas. A taxa de juros, i , utilizada nos cálculos, geralmente é representada pela taxa mínima atrativa (TMA), a qual resume o valor mínimo onde o investidor poderá ter lucros (Ochoa *et al.*, 2011). Este VPL pode ser calculado segundo a equação 3:

$$VPL = Inv_{inicial} + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1+i)^j} \quad (3)$$

A decisão é interpretada da seguinte forma:

- a) Um VPL maior que zero ($VPL > 0$), o capital investido, será recuperado e terá um resultado positivo ao predito com a taxa mínima atrativa (TMA);
- b) Um VPL menor que zero ($VPL < 0$), o capital investido, não será recuperado, deste modo o projeto não será viável economicamente.

3.5.2 Taxa interna de retorno – TIR

A taxa interna de retorno representa a taxa, i , na qual o valor presente iguala-se dos custos de um ou mais equipamentos, com os valores das entradas do caixa (PUCCINI, 2012). Matematicamente, o indicador TIR, é calculada quando o valor do VPL de qualquer projeto torna-se zero, a equação 4 é utilizada para realizar este cálculo.

$$VPL = investimento\ inicial + \sum_{j=1}^N \frac{FC(j)}{(1+TIR)^j} = 0 \quad (4)$$

A interpretação deste indicador esta vinculada à seguinte lógica:

- a) $TIR > TMA$; representa um investimento atrativo do ponto de vista financeiro;
- b) $TIR = TMA$; representa um investimento indiferente;
- c) $TIR < TMA$; representa um investimento não atrativo do ponto de vista financeiro.

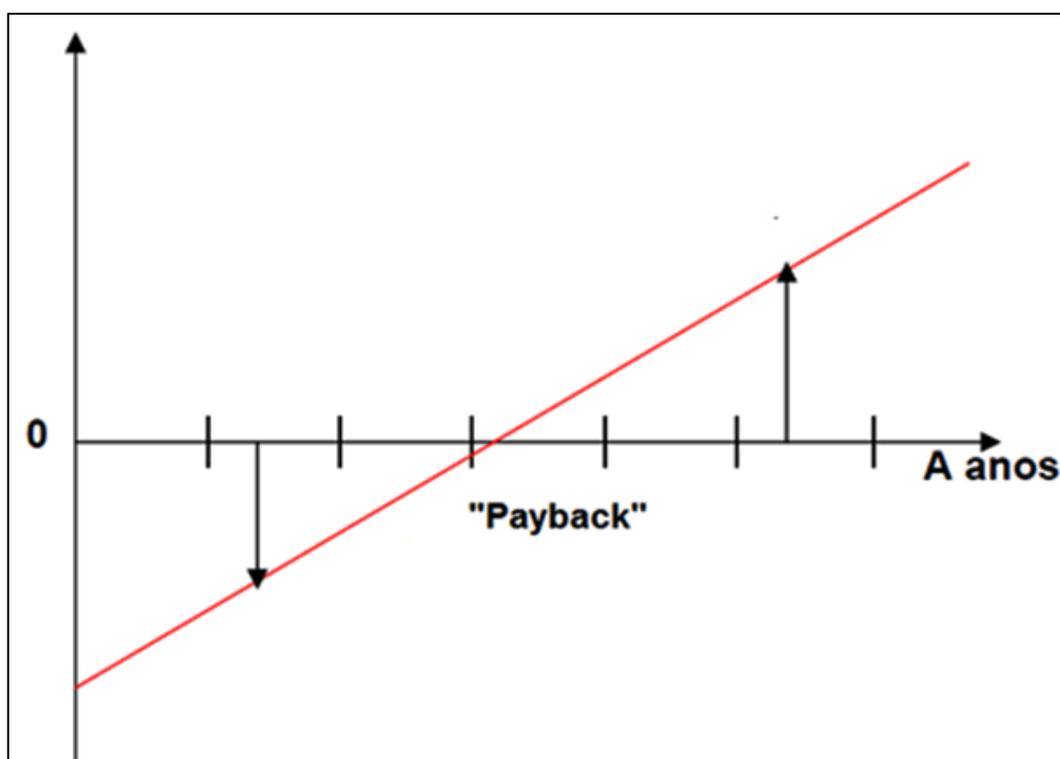
3.5.3 Tempo de retorno do capital (Payback)

Este indicador está relacionado com o tempo de recuperação do capital investido em determinado projeto. Financeiramente, o payback representa o tempo transcorrido entre o pagamento do investimento inicial até o momento no qual, este investimento realizado no

projeto é recuperado pelo investidor. Representa o indicador mais utilizado pelos analisadores para a tomada de decisões em projetos (Ochoa *et al.*, 2011). A Figura 29 mostra um esquema gráfico da interpretação do payback para qualquer projeto analisado. Sua interpretação pode ser entendida da seguinte forma:

Para valores de *Payback* menores ao tempo do projeto, tem-se um argumento para aceitar o projeto, em caso contrário, pode-se rejeitar o projeto. Além disso, quanto menor o valor deste indicador, maior a possibilidade de viabilidade econômica do projeto, portanto, o investimento do projeto será recuperado mais rápido, e pode garantir um menor risco para o projeto.

Figura 29 – *Payback* para projetos.



Fonte: O AUTOR (2015).

4 METODOLOGIA

A metodologia deste trabalho explicará como e quais foram às etapas cumpridas para que os objetivos gerais e específicos fossem atingidos. Este trabalho tem por objetivo modelar um sistema de cogeração para edifícios de uma universidade no nordeste brasileiro, onde o clima é quente e úmido.

A primeira etapa a ser feita foi o levantamento da demanda anual de energia da universidade, no caso desse trabalho a Universidade Federal da Paraíba (UFPB). A demanda é composta de energia elétrica e térmica, frio e/ou calor. No trabalho de Araújo (2015) foram medidos os consumos elétricos mensais dos anos de 2011 e 2012. Essas informações são de extrema importância, porém não são suficientes para caracterizar a demanda, já que a eletricidade também é usada para climatização dos edifícios. Para dimensionar corretamente os equipamentos para a cogeração é necessário conhecer o perfil de cada tipo de energia que será utilizada no local de consumo.

Tomar as potências dos equipamentos de climatização e seus rendimentos fornecidos pelo fabricante daria uma medida muito fora da realidade. Porque o clima e as condições de operação estão muito distantes das condições nominais de funcionamento. Ou seja, o desempenho e consumo são muito piores do que o esperado. Por isso, este trabalho propõe uma metodologia para separar do consumo elétrico, qual seria a parcela destinada a climatização.

Conhecido o perfil de demanda elétrica da universidade, foi detectado o mês do ano de menor consumo de eletricidade. Com isso, foi feita a hipótese que este mês que o consumo de energia devido à climatização é mínimo, já que o mês de inverno possui o menor consumo de eletricidade. Outra hipótese foi que todo o consumo é devido à iluminação e equipamentos de escritório, assim seria possível calcular quanto foi gasto apenas com climatização. Essa metodologia foi adotada primeiramente para o edifício da reitoria, mas poderia ser aplicada a qualquer outro prédio da universidade. O edifício da reitoria foi selecionado pela quantidade de dados disponíveis para realização do trabalho.

Em 2011 foi medido o consumo de toda universidade e foram contabilizadas as áreas de cada edifício da universidade no trabalho de Araújo (2015). O consumo anual total elétrico da universidade é de aproximadamente 14.000 MWh. A UFPB possui aproximadamente 170 mil metros quadrados de área construída. A área e a potência instalada da reitoria representam aproximadamente 6% da universidade. Com isso, foi assumido que 6% do consumo total como sendo o consumo elétrico da reitoria. Para separar o consumo dos equipamentos

elétricos do consumo dos equipamentos de ar condicionado foi adotada a seguinte estratégia. Primeiro, assumindo que todo o consumo elétrico pode ser dividido em três partes: Climatização, iluminação e equipamentos, como pode ser visto na equação 5. A capacidade de iluminação da reitoria era um dado conhecido. O número de dias trabalhado foi baseado nos calendários de 2011 e 2012, além disso a jornada de trabalho na reitoria é de turno administrativo, ou seja, 8h diárias.

$$TC = C_{ac} + C_e + C_i \quad (5)$$

Onde,

- a) TC é o consumo total;
- b) C_{ac} é o consumo de ar condicionado;
- c) C_e é o consumo de equipamentos;
- d) C_i é o consumo de iluminação.

O consumo anual [kWh] de iluminação foi calculado pela equação (6):

$$C_i = IC \times WD \times HPD \quad (6)$$

Onde,

- a) IC é a capacidade de iluminação;
- b) WD é o número de dias de trabalho no mês;
- c) HPD é o número de horas trabalhadas por dia.

Para que a equação tenha solução é necessária informar os períodos do ano que não há climatização, pois só temos uma equação e duas incógnitas. Para a cidade de João Pessoa, o período onde a climatização é menos necessária é em julho. Por questões de conforto, pode-se utilizar, já que é uma região de grande umidade. Julho também é mês de recesso escolar, ou seja, a reitoria sofre uma redução de demanda neste mês. Assim, foi possível calcular que, se não há consumo de frio (por hipótese), todo o consumo elétrico é devido a equipamentos e iluminação. A potência de iluminação da reitoria é de 60.100 W e o edifício funciona 8 horas por dia e durante o mês de julho funciona apenas 15 dias. Logo, como pode ser visto na Tabela 2. Foram calculados o consumo de iluminação e a taxa diária partir desses dados.

Tabela 2 – Consumo de equipamento e iluminação.

Julho	Iluminação	Equipamentos	Unidade
2011	7212.00	33287.25	KWh
2011	480.80	2219.15	KWh/dia
2012	10577.60	31541.62	KWh
2012	705.17	2102.77	KWh/dia

Fonte: O AUTOR (2015).

A potência de iluminação era um dado conhecido, logo subtraindo o consumo total da iluminação do prédio no mês de julho se obtém o consumo dos equipamentos. Em seguida, dividimos os consumos elétricos pela quantidade de dias laborais, como pode ser visto na Tabela 2. Conhecendo a quantidade de dias que foi trabalhada em cada mês do ano, é possível calcular os valores de consumo de equipamentos e iluminação para cada mês do ano. E por fim, a diferença para o total foi assumida como a parte da eletricidade destinada aos equipamentos de climatização. Assim foi possível caracterizar os diferentes tipos de consumo para o ano inteiro.

Tabela 3 – Distribuição de consumo elétrico 2011.

Dias Úteis	Mês	Cons. Ponta [kWh]	Cons. F. Ponta [kWh]	Total [kWh]	iluminação [kWh]	Equipo [kWh]	Frio [kWh]	Frio [%]
10	Janeiro	4407.15	49231.05	53638.20	4808.00	22191.50	26638.70	49.66%
15	Fevereiro	5163.40	54985.15	60148.55	7212.00	33287.25	19649.30	32.67%
23	Março	7508.60	69838.45	77347.05	11058.40	51040.45	15248.20	19.71%
21	Abril	5046.80	42384.10	47430.90	10096.80	46602.15	-9268.05	-19.54%
22	Maiο	8105.35	70614.50	78719.85	10577.60	48821.30	19320.95	24.54%
22	Junho	6916.80	59211.35	66128.15	10577.60	48821.30	6729.25	10.18%
15	Julho	4404.40	36094.85	40499.25	7212.00	33287.25	0.00	0.00%
21	Agosto	6201.80	52551.40	58753.20	10096.80	46602.15	2054.25	3.50%
22	Setembro	7445.35	63948.50	71393.85	10577.60	48821.30	11994.95	16.80%
21	Outubro	7799.55	70697.00	78496.55	10096.80	46602.15	21797.60	27.77%
21	Novembro	8094.35	70481.40	78575.75	10096.80	46602.15	21876.80	27.84%
18	Dezembro	6838.70	63568.45	70407.15	8654.40	39944.70	21808.05	30.97%

Fonte: O AUTOR (2015).

Porém, como pode ser observado no mês de abril de 2011 há uma anomalia no consumo, diferentemente de 2012. Isso foi devido a uma greve dos trabalhadores da universidade. Esse valor foi desconsiderado nas simulações e o valor de 2012 foi utilizado. Nas Tabelas 3 e 4 estão mostradas as porcentagens do consumo destinadas a climatização

encontradas. Essas porcentagens foram utilizadas na modelagem para determinar o quanto da demanda era para o frio. E posteriormente calcular a demanda térmica de frio.

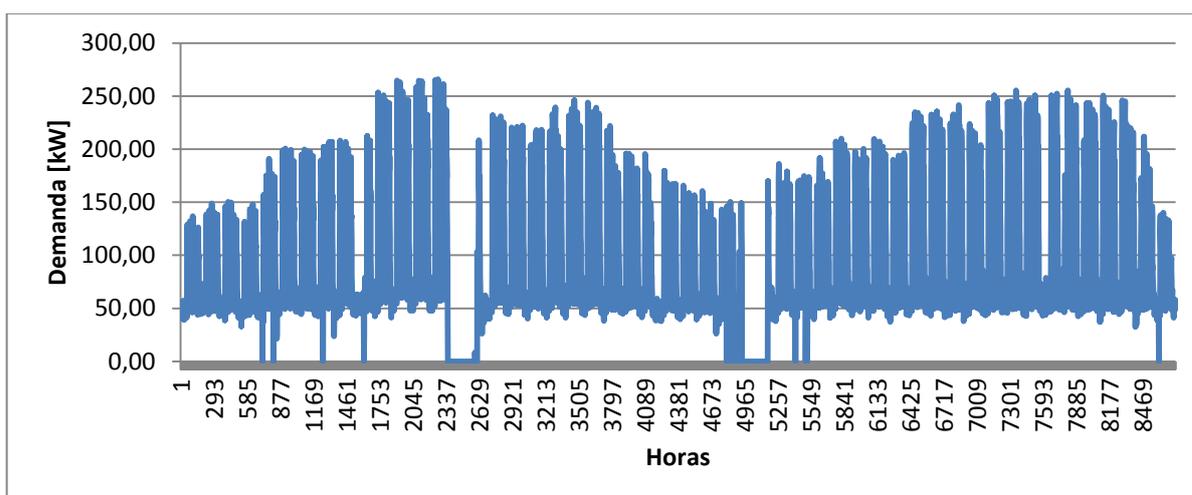
Tabela 4 – Distribuição de consumo elétrico 2012.

Dias Úteis	Mês	Cons. Ponta [kWh]	Cons. F. Ponta [kWh]	Total [kWh]	iluminação [kWh]	Equipo [kWh]	Frio [kWh]	Frio [%]
10	Janeiro	4805.90	50891.50	55697.40	7051.73	21027.75	27617.92	49.59%
15	Fevereiro	5253.05	56378.30	61631.35	10577.60	31541.62	19512.13	31.66%
22	Março	8908.35	80007.40	88915.75	15513.81	46261.04	27140.89	30.52%
21	Abril	8522.25	74888.55	83410.80	14808.64	44158.27	24443.89	29.31%
23	Mai	8753.80	74263.75	83017.55	16218.99	48363.82	18434.75	22.21%
21	Junho	7055.13	62171.95	69227.07	14808.64	44158.27	10260.16	14.82%
15	Julho	4580.57	37538.66	42119.22	10577.60	31541.62	0.00	0.00%
21	Agosto	6315.16	53602.45	59917.61	14808.64	44158.27	950.70	1.59%
22	Setembro	7743.18	66506.44	74249.62	15513.81	46261.04	12474.76	16.80%
20	Outubro	8111.51	73524.88	81636.39	14103.47	42055.49	25477.43	31.21%
21	Novembro	8175.31	71186.23	79361.54	14808.64	44158.27	20394.63	25.70%
18	Dezembro	6907.07	64204.14	71111.21	12693.12	37849.94	20568.14	28.92%

Fonte: O AUTOR (2015).

Partindo da demanda de eletricidade da universidade e das porcentagens de frio para cada mês da reitoria foi calculada quanto seria a demanda elétrica da reitoria (6% da UFPB), como pode ser visto na Figura 30.

Figura 30 – Demanda elétrica anual da reitoria.



Fonte: O AUTOR (2015).

O total destinado à climatização foi calculado e apresentado nas Tabelas 3 e 4. Para calcular o consumo elétrico devido a climatização foram adotadas algumas hipóteses. Sabe-se

que a forma de climatização do edifício é a partir de ar condicionado de janela e *split*, que a umidade local é bastante elevada, que não há um planejamento de manutenção dessas máquinas e não há controle de temperatura, assumimos então, que o COP dos equipamentos seria próximo de 1,5. Com este valor, é possível calcular a energia térmica que é utilizada. A proposta deste trabalho é sugerir o uso de tecnologias de cogeração, então para calcular a demanda de energia primária foi utilizado o COP de um *chiller* de absorção, como pode ser visto nas equações de (7) a (9). O rendimento típico de um equipamento como esse, quando trabalha a plena carga é de aproximadamente 0,7.

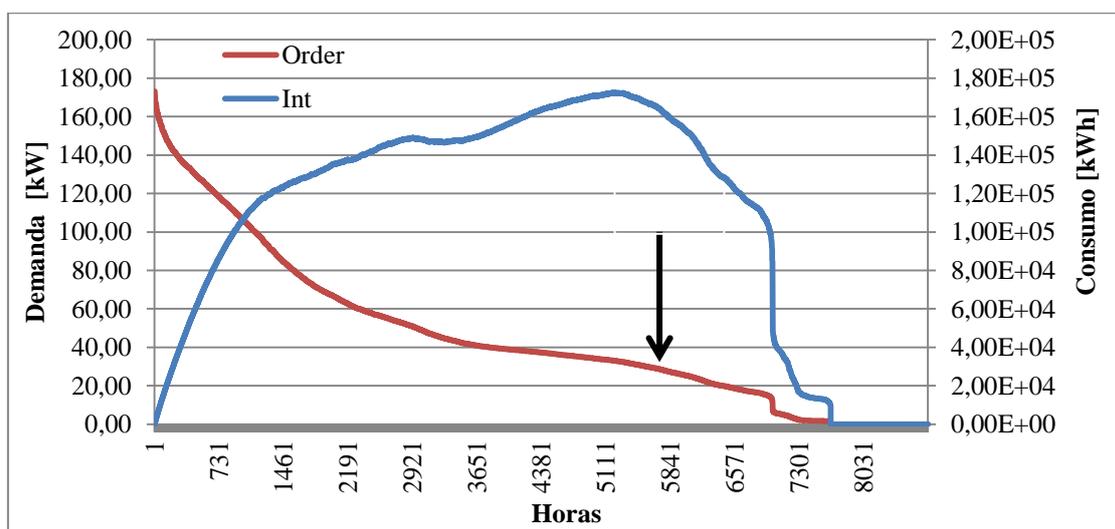
$$E_{primaria} = ([6\%Demanda] \times [FRIO\%] \times COP_{split}) / COP_{absorption} \quad (7)$$

$$COP_{split} = \frac{Q_c}{W_{liq}} \quad (8)$$

$$COP_{abs} = \frac{Q_l}{Q_{gerador}} \quad (9)$$

Descoberta a energia primária necessária para reitoria, ordenamos em forma decrescente para encontrar qual a potência demandada mais comum durante o ano. Também foi feita uma integração da demanda para descobrir qual é o dia de maior consumo do ano. Essas duas curvas são mostradas na Figura 31.

Figura 31– Demanda decrescente e integralização.

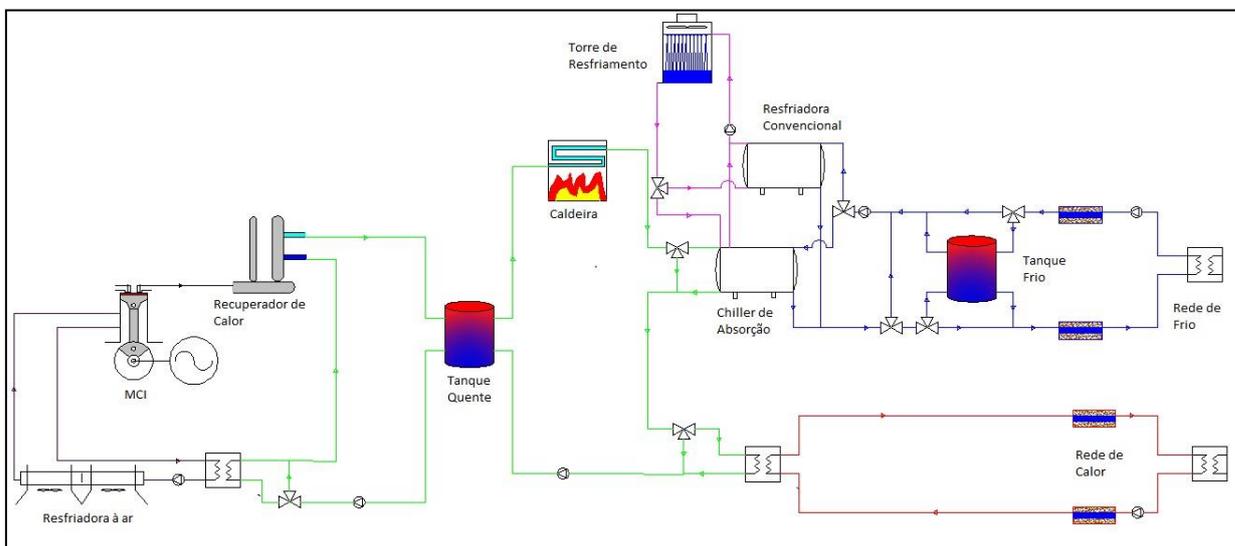


Fonte: O AUTOR (2015).

A curva vermelha (*Order*) da Figura 32 mostra em ordem decrescente a demanda anual de energia primária. A curva azul representa a integral no tempo da demanda. Com essas duas curvas é possível ter uma ideia dimensão do sistema que pode suprir essa demanda.

A configuração da cogeração para atender as necessidades desse edifício é um motor de combustão interna (MCI) a gás natural com termo acumulação e um *chiller* de absorção. Na Figura 32 está apresentado o sistema de forma ilustrada.

Figura 32 – Esquema do sistema de cogeração em TRNEdit.



Fonte: O AUTOR (2015).

Como pode ser visto na Figura 32, além dos equipamentos já citados, há outros equipamentos que são necessários para que o sistema funcione. Foi adicionada uma caldeira a gás para atender a demanda de calor, uma torre de resfriamento a saída do calor residual, um tanque de água fria, uma *chiller* convencional mecânico, além dos sistemas de rede e distribuição de água fria.

Para dimensionar os equipamentos deste sistema é primeiro necessário escolher o tamanho do motor que vai suprir a demanda de calor. A demanda mais comum, que cobre quase 80% do ano é 20 kW_e. O valor de 80% foi escolhido para que o motor pudesse ser utilizado durante todo o ano e quase sempre utilizado na potência nominal. Por isso, esta foi à potência escolhida para o motor de combustão interna. Além disso, este equipamento pode atender até 38 kW térmicos. Essa potência não é suficiente para atender a demanda, para isso está a caldeira auxiliar. A caldeira selecionada foi de 150 kW, com essa potência é possível atender aos horários de máxima demanda. Para ter opções de estratégia de geração de calor também foi dimensionado um tanque de acumulação, um de água quente e outro de água fria. Os tanques de água fria e quente têm 30 e 10 m³, respectivamente. Ambos foram calculados com um tempo de acumulação de 6 horas. As diferenças de temperaturas de entrada e saída dos tanques frio e quente são 5 e 20 graus, respectivamente.

Para a climatização foi selecionado um *chiller* de absorção de 10 TR. E um *chiller* mecânico de 100 kW. Esses dois devem abastecer o tanque de água fria. A rede de distribuição se encarrega de levar a água gelada até o ponto de consumo. Esta, foi feita de forma simples com cálculos básicos, não foi levada em conta a distribuição pelo edifício, apenas tubulação única de ida e retorno do fluido.

O software utilizado para simular todos esses equipamentos de forma integrada foi o TRNEdit. Este software foi desenvolvido pela Universidade de Málaga e utiliza como base as ferramentas do TRNSYS. E é possível através do TRNEdit estudar viabilidade financeira, energética e ambiental desse tipo de sistema de suprimento de energia proposto neste trabalho. De cada equipamento é necessária uma tabela de dados que tratem do desempenho em cargas parciais. Essas tabelas são importantes, pois os equipamentos vão trabalhar a maior parte do tempo em cargas parciais. Além disso, também é necessário o arquivo de clima do tipo utilizado por *EnergyPlus*. No caso de João Pessoa não há. Então, o arquivo utilizado foi o da cidade de Recife. É o clima disponível que mais se assemelha a João Pessoa.

Nas Tabelas de 5 a 10 são apresentados os dados de entradas dos equipamentos utilizados na simulação da cogeração, todos esses dados alimentam o TRNEdit, para que seja possível calcular o comportamento ao longo de todo o ano dos equipamentos baseado nas demandas energéticas. Todos esses dados representam valores reais dos equipamentos em funcionamento em carga nominal e parcial.

Tabela 5 – Dados do Motor.

T [°C]	Carga [%]	Elétrica/ Nominal [kW/kW]	Eixo/Calor [kW/kW]	Elétrica/Eixo [kW/kW]	Jaqueta/ (Calor- Eixo) [kW/kW]	Óleo/ (Calor- Eixo) [kW/kW]	Escape/ (Calor- Eixo) [kW/kW]	Aftercooler (Calor- Eixo) [kW/kW]	Ambiente/ (Calor-Eixo) [kW/kW]	Taxa de Vazão [(kg/h)/(kg/h)]
25	0.50	0.498	0.385	0.965	0.273	0.094	0.514	0.051	0.068	1.000
25	0.75	0.749	0.405	0.970	0.234	0.084	0.512	0.114	0.056	1.000
25	1.00	1.000	0.417	0.404	0.204	0.080	0.495	0.165	0.055	1.000
35	0.50	0.481	0.373	0.934	0.265	0.091	0.497	0.050	0.065	0.968
35	0.75	0.724	0.392	0.938	0.227	0.081	0.496	0.110	0.054	0.968
35	1.00	0.968	0.403	0.391	0.197	0.078	0.479	0.160	0.054	0.968
45	0.50	0.467	0.361	0.905	0.256	0.088	0.465	0.048	0.063	0.938
45	0.75	0.702	0.380	0.909	0.220	0.079	0.481	0.107	0.052	0.938
45	1.00	0.938	0.391	0.379	0.191	0.075	0.465	0.155	0.052	0.938

Fonte: O AUTOR (2015).

Tabela 6 – Dados do *chiller* mecânico.

Razão de Capacidade	Razão de COP	Temperatura de Saída da Água (°C)	Temperatura de entrada da Água (°C)
0.91	0.85	4	25
0.87	0.74	4	30
0.83	0.64	4	35
0.79	0.56	4	40
0.95	0.87	5	25
0.90	0.76	5	30
0.86	0.66	5	35
0.82	0.57	5	40
0.98	0.90	6	25
0.94	0.78	6	30
0.89	0.68	6	35
0.85	0.59	6	40
1.01	0.92	7	25
0.97	0.80	7	30
0.92	0.70	7	35
0.88	0.61	7	40
1.05	0.95	8	25
1.00	0.83	8	30
0.95	0.72	8	35
0.91	0.62	8	40
1.09	0.97	9	25
1.04	0.85	9	30
0.99	0.74	9	35
0.94	0.64	9	40
1.12	1.00	10	25
1.07	0.87	10	30
1.02	0.76	10	35
0.97	0.66	10	40
1.23	1.07	13	25
1.18	0.94	13	30
1.13	0.82	13	35
1.07	0.71	13	40
1.36	1.16	16	25
1.30	1.01	16	30
1.24	0.90	16	35
1.18	0.77	16	40

Fonte: O AUTOR (2015).

Tabela 7 – Carga Parcial compressor parafuso.

Carga	kW saída	kWentra	COP
100%	182	38	4.79
75%	143	26	5.50
50%	100	15	6.67
25%	49	7	7.00

Fonte: O AUTOR (2015).

Tabela 8 – Eficiência da Caldeira.

Carga	Temperatura de entrada da água (°C)	Eficiência (%)	Carga	Temperatura de entrada da água (°C)	Eficiência (%)
0.05	15.50	99.32	0.05	43.30	93.84
0.25	15.50	98.32	0.25	43.30	93.08
0.50	15.50	97.56	0.50	43.30	92.30
0.75	15.50	97.22	0.75	43.30	91.80
1.00	15.50	96.73	1.00	43.30	91.10
0.05	21.10	98.68	0.05	48.90	91.40
0.25	21.10	97.78	0.25	48.90	90.70
0.50	21.10	97.00	0.50	48.90	89.80
0.75	21.10	96.60	0.75	48.90	89.30
1.00	21.10	96.22	1.00	48.90	88.90
0.05	26.70	98.00	0.05	54.40	89.10
0.25	26.70	97.00	0.25	54.40	88.50
0.50	26.70	96.40	0.50	54.40	88.00
0.75	26.70	95.88	0.75	54.40	87.50
1.00	26.70	95.55	1.00	54.40	87.30
0.05	32.20	97.10	0.05	60.00	87.70
0.25	32.20	96.20	0.25	60.00	87.30
0.50	32.20	95.40	0.50	60.00	86.70
0.75	32.20	95.00	0.75	60.00	86.40
1.00	32.20	94.68	1.00	60.00	86.30
0.05	37.70	95.70	0.05	65.50	87.10
0.25	37.70	94.90	0.25	65.50	86.87
0.50	37.70	94.20	0.50	65.50	86.37
0.75	37.70	93.67	0.75	65.50	86.10
1.00	37.70	93.14	1.00	65.50	85.90
0.05	43.30	93.84	0.05	71.10	87.00
0.25	43.30	93.08	0.25	71.10	86.70
0.50	43.30	92.30	0.50	71.10	86.30
0.75	43.30	91.80	0.75	71.10	86.00
1.00	43.30	91.10	1.00	71.10	85.90

Fonte: O AUTOR (2015).

Tabela 9 – Eficiência do Chiller de absorção.

Carga	Temperatura Água gelada	Temperatura de Água Fria	Temperatura da Água quente	TON de Frio	COPtc
0	5	24.0	75.0	10.65	0.70
0	5	24.0	80.0	11.50	0.67
0	5	24.0	85.0	11.80	0.61
0	5	24.0	87.8	12.40	0.60
0	5	24.0	95.0	13.10	0.53
0	5	29.5	75.0	5.70	0.66
0	5	29.5	80.0	7.00	0.64
0	5	29.5	85.0	7.50	0.62
0	5	29.5	87.8	9.45	0.62
0	5	29.5	95.0	11.00	0.57
0	5	31.0	75.0	4.20	0.65
0	5	31.0	80.0	6.60	0.60
0	5	31.0	85.0	7.40	0.63
0	5	31.0	87.8	8.40	0.59
0	5	31.0	95.0	8.50	0.51
0	5	32.0	75.0	2.60	0.50
0	5	32.0	80.0	5.00	0.57
0	5	32.0	85.0	5.80	0.54
0	5	32.0	87.8	7.00	0.52
0	5	32.0	95.0	8.50	0.50
0	6	24.0	75.0	10.80	0.74
0	6	24.0	80.0	12.20	0.72
0	6	24.0	85.0	12.90	0.67

Fonte: O AUTOR (2015).

Tabela 10 – Dados da Rede de distribuição.

Tubo	DN32
Ueq (W/m² K)	0.610827
Aeq (m²)	22.04147
Ve_q (m³)	0.193304
De_q (m)	0.03508
Le_q (m)	200

Fonte: O AUTOR (2015).

Em resumo, os equipamentos selecionados estão apresentados na Tabela 11. Todos os dados dos equipamentos foram extraídos de catálogos de equipamentos reais. Que se acercavam dos valores nominais previamente dimensionados. A simulação foi feita com objetivo de atender tecnicamente as demandas do edifício, além de analisar financeira e ambientalmente o sistema de cogeração.

Tabela 11 - Equipamentos selecionados para reitoria.

Equipamentos	Tamanho
Motor	20 kW _e
Chiller de absorção	35 kW _{th}
Caldeira auxiliar	150 kW _{th}
Chiller convencional	100 kW _{th}
Tanque frio	30 m ³
Tanque quente	10 m ³

Fonte: O AUTOR (2015).

Para as simulações foram utilizadas as equações de continuidade (10) e conservação de energia (11) para sistemas para os cálculos de balanço mássico e energético, além da quantificação da emissão de CO₂ pelo motor, turbina e caldeira auxiliar. Para análise financeira foram usadas as equações de fluxo de caixa (CF) (12), valor presente líquido (NPV) (13) e *payback* (14).

$$\left(\frac{dm}{dt}\right)_{system} = 0 \quad (10)$$

$$\dot{W} - \dot{Q} = \left(\frac{dE}{dt}\right)_{system} \quad (11)$$

$$CF = \sum I - E \quad (12)$$

Onde,

- a) *I* é a soma das receitas mensais;
- b) *E* é a soma das despesas mensais.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \left(\frac{CF_t}{(1+i)^t}\right) \quad (13)$$

Onde,

- a) CF é o fluxo de caixa;
- b) *t* é o tempo;
- c) *i* é a taxa de juros .

$$Payback = \frac{TCI}{ACF} \quad (14)$$

Onde,

- a) TCI é o custo total de investimento;
- b) ACF é o fluxo de caixa anual.

Nas simulações técnica e financeira foi utilizado o TRNEdit, programa desenvolvido para análise térmica desse tipo solução energética, este software usa as equações citadas numa plataforma de TRNSYS para calcular a viabilidade técnica e ambiental, os dados sobre a

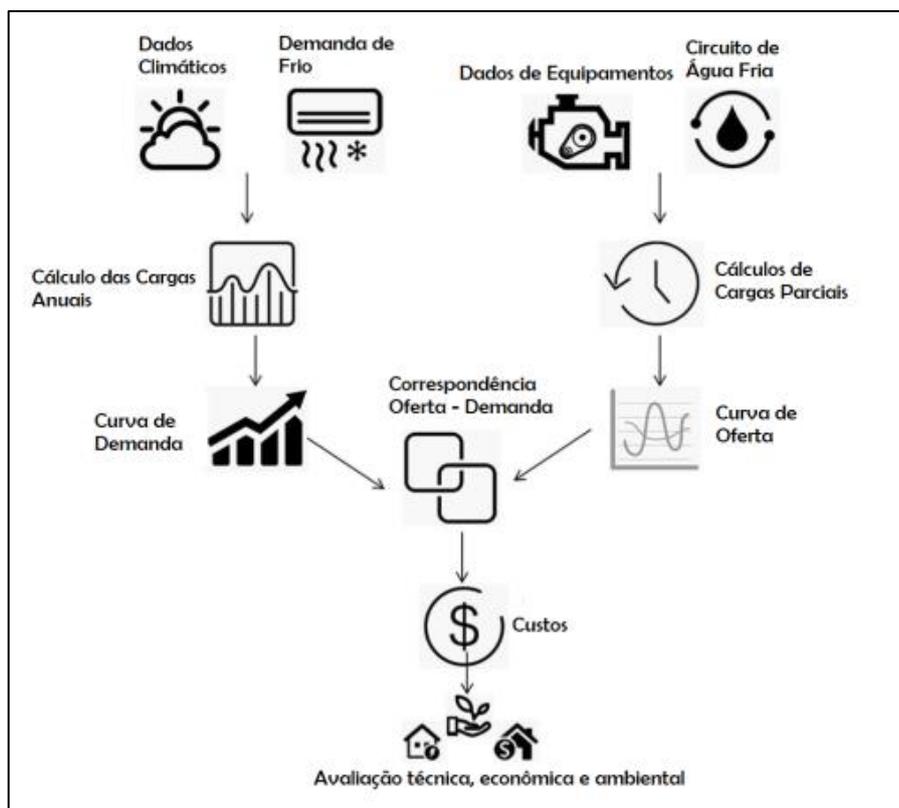
eficiência do equipamento levando em consideração inclusive cargas parciais. Cargas parciais são de extrema importância, pois os equipamentos dificilmente operaram em carga máxima, o comportamento do equipamento precisa ser conhecido para usá-lo sempre nas melhores condições. Portanto, as tabelas dos pontos de carga parcial de cada equipamento que foram apresentadas, foram inseridas no software de simulação. Dados sobre carga parcial não estão disponíveis para todos os equipamentos. Assim, foram utilizados dados sobre equipamentos da mesma ordem de grandeza encontrados no mercado. Os dados sobre motores são, por exemplo, de um motor GE Jenbacher J208, como mostrado na Tabela 4. Para o resfriador de compressão, dados de um resfriador mecânico de 175 kW com um compressor de parafuso foram usados, conforme mostrado nas Tabelas 5 e 6.

Na Figura 33 está apresentado a sequência utilizada para avaliação técnica econômica e ambiental do sistema de cogeração proposto, baseado nas cargas parciais dos equipamentos e demandas anuais dos edifícios. Além dos dados técnicos dos equipamentos, também é necessário fornecer ao software, dados climáticos, as demandas de frio, tarifas de gás e eletricidade e custos dos equipamentos. As condições climáticas e a demanda do edifício são utilizadas para cálculo das cargas a serem atendidas, esses dados foram extraídos do arquivo do *EnergyPlus*, disponível na internet no sítio do Departamento de Energia dos Estados Unidos. A demanda de frio já utilizada a metodologia apresentada nesse capítulo.

Este trabalho teve início numa cooperação entre a UFPE e a Universidade Roriva i Virgili (URV), assim, parte dos dados financeiros, referentes aos custos de motores, turbinas, máquinas de frio, bem como tubulações, levaram em consideração custos na Europa. Ou seja, os custos dos equipamentos podem apresentar alguma discordância com o mercado Brasileiro. Não foram considerados encargos de importação e/ou exportação, nem o frete dos produtos. Como já foi citado anteriormente, esse custo são variáveis e estão a mercê do mercado. Os casos estudados apresentam uma solução que pode ser considerada, do ponto de vista econômico, ideal. Tendo em vista que os custos serão mais elevados do que os calculados neste trabalho. No final serão calculados os custos para atender a demanda, a viabilidade técnica do sistema e o quanto de gases poluentes (CO₂) serão emitidos.

No Brasil, a estrutura tarifária é feita por faixa e classifica os consumidores em dois grupos, basicamente divididos pelo nível de tensão de alimentação a que são servidos, ou seja, Grupo A, que tem tarifa binomial e Grupo B, que tem taxa monominal. No Grupo B, as unidades consumidoras possuem uma tensão de alimentação inferior a 2300V. Estes incluem residências, residências de baixa renda, áreas rurais, entre outros.

Figura 33 – Fluxograma básico para modelagem técnica e financeira do sistema de cogeração.



Fonte: O AUTOR (2015).

O grupo A é formado por consumidores de alta tensão, acima de 2300V, como shopping centers, indústrias, edifícios comerciais. Como a universidade é grande, recebe eletricidade a uma voltagem muito alta. Nós classificamos no Grupo A4, tarifa azul é a tarifa que é utilizada nos edifícios de serviço público, como pode ser observado na Tabela 12. Observe que os valores considerados foram as tarifas de 2016. No entanto, estes estão sujeitos a alterações. As flutuações de mercado podem trazer alterações no preço de compra e venda de eletricidade, bem como crises energéticas ou falta de abastecimento ou de chuvas, pode influenciar no valor pago pela energia elétrica.

Tabela 12 - Preço da Eletricidade.

		Demanda (\$/kW)		Sobre demanda (\$/kW)		Consumo (\$/kWh)	
		Pico	Fora de Pico	Pico	Fora de pico	Pico	Fora de pico
Fare A4 Tarifa Azul Serviço público	US\$	7.7616	2.6376	15.5232	5.2752	0.0678	0.0450
	Euro	7.1867	2.4422	14.3733	4.8844	0.0628	0.0417

Fonte: O AUTOR (2015).

O preço do gás baseou-se apenas no consumo, como pode ser visto na Tabela 13. O preço do gás depende das políticas de cada estado, mas eles seguem um padrão quando se trata do tipo de cobrança. Para os setores de indústria e comércio, as cobranças são feitas por faixa de consumo. Para o estado da Paraíba, existem apenas duas faixas para consumo residencial e há um preço diferente para a geração distribuída, como pode ser verificado no site da companhia paraibana de gás [PBGAS]. Em Pernambuco, outro estado no nordeste do Brasil, existem tarifas diferentes para a cogeração e o preço dependerá da quantidade de gás consumido no mês, inclusive o valor do volume de gás natural comprado é diferente, se a empresa faz cogeração, ou utiliza um sistema convencional de abastecimento de energia.

Tabela 13 - Preço do Gás.

Preço do Gás	0.019929	US\$/Nm ³
	0.018453	euro/ Nm ³

Fonte: O AUTOR (2015).

Neste capítulo foi apresentada a metodologia utilizada para encontrar as demandas energéticas dos edifícios, foram apresentados os dados reais de equipamentos, que foram utilizados na simulação de viabilidade técnica e financeira de um sistema de cogeração para atendimento da demanda energética da UFPB, campus João Pessoa.

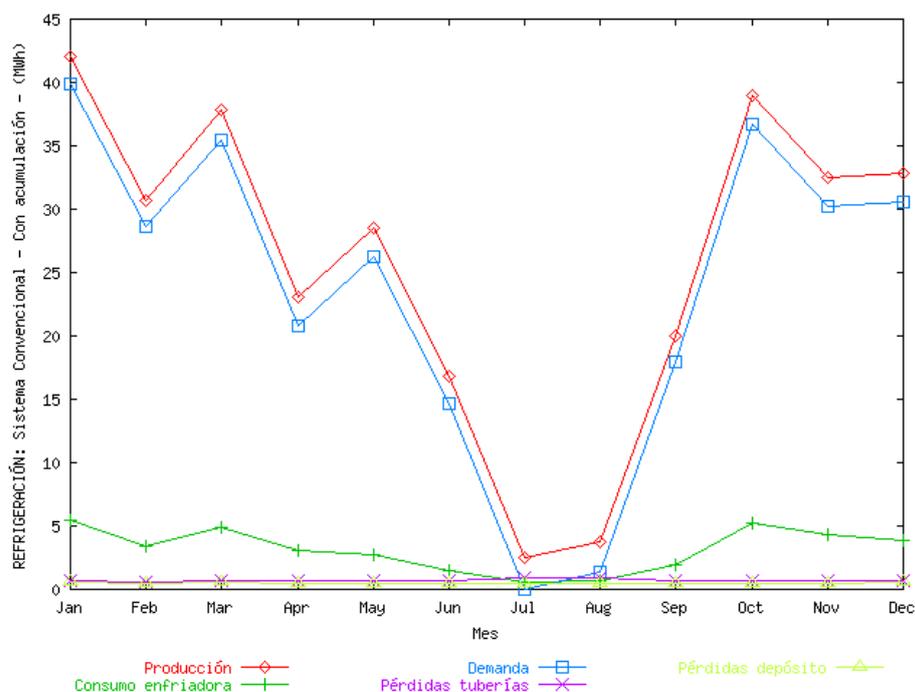
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão abordados os principais resultados encontrados nas simulações realizadas com a metodologia do capítulo anterior. Primeiro estudo de caso foi feito na reitoria, o segundo num conjunto de edifícios e o terceiro no hospital.

5.1 REITORIA

O software TRNSEdit foi desenvolvido para análise financeira, econômica e ambiental de sistemas de cogeração ou trigeração. A primeira análise feita a partir deste software foi o prédio da reitoria. O primeiro ponto a ser analisado foi se este tipo de sistemas, se é possível atender as demandas de frio, calor e/ou eletricidade. Ou seja, se tecnicamente é possível suprir as necessidades esperadas. Na Figura 34 estão mostradas a produção de frio, a demanda de frio, bem como o consumo do *chiller* e as perdas no tanque e tubulações. Assim, pode-se analisar a produção de frio, na linha vermelha está por cima de linha azul, que representa a demanda de frio. Isso significa, que o sistema dimensionado atende as demandas de frio ao longo de todo o ano. A Figura 34 mostra a capacidade técnica do sistema, porém esse não é o único ponto que deve ser abordado, quando se trata de sistemas de abastecimento de energia.

Figura 34 – Produção de Frio (vermelha), Demanda de frio (azul), Consumo do *Chiller* (verde), perdas no tanque(amarela) e na tubulação (roxa).



Fonte: O AUTOR (2016).

Outro parâmetro que pode ser observado para saber se os equipamentos foram bem dimensionados e estão sendo utilizados mais próximos de sua condição nominal são as cargas parciais máximas. A condição nominal de utilização de um equipamento seriam as condições para qual o equipamento foi projetado para atingir sua performance máxima de operação. Isso seria o ideal, um equipamento funcionando sempre a carga nominal, teria sempre seu rendimento máximo. Porém, não é isso que acontece na realidade. Muito dificilmente um equipamento desse tipo vai operar sempre em carga nominal, estes equipamentos podem funcionar muitas horas durante o ano em carga parcial, ou seja, em uma carga menor do que o equipamento foi projetado para funcionar. Isso faz com que o rendimento das máquinas diminua, o que pode tornar o sistema mais oneroso e/ou até mais poluente. Por isso, neste trabalho foi analisado as cargas parciais máximas. Na Tabela 14 estão mostradas duas cargas parciais máximas. A carga parcial máxima do circuito primário(adimensional), ou seja, a quantidade de potência gerada para operação das máquinas dividido pela potência nominal e a carga parcial máxima dos *chillers*, que diz respeito a produção de frio dividido pela capacidade nominal das máquinas. Poderia também ser feito a carga parcial máxima do circuito de aquecimento, mas no estudo não foi utilizado, pois não há necessidade de aquecimento no edifício.

O ideal para esses indicadores é que seja mais próximo de 1, ou seja, 100% da carga está sendo utilizada naquele instante. Caso esses indicadores sejam menores que 1, indica que os equipamentos estão superdimensionados e não estão sendo utilizados na sua carga nominal. Por outro lado, se esses indicadores são maiores que um, significa que os equipamentos estão subdimensionados e as cargas superam a capacidade de produção do sistema. Se o valor for muito próximo de zero, ou muito maior que um, o sistema deve ser redimensionado para tentar maximizar o rendimento global do sistema.

Tabela 14 – Cargas parciais máximas.

Carga parcial máximo do Circuito primário	102 %
Carga parcial máxima dos <i>chillers</i>	103 %

Fonte: O AUTOR (2016).

Como pode ser deduzido a partir da Tabela 14 e da Figura 35, o sistema escolhido atende tecnicamente bem a demanda da reitoria da UFPB. Porém, como pode ser visto na Tabela 15, o tempo para que o investimento seja pago é de 50 anos. Este número está muito acima da expectativa em geral de investidores. Sem contar, que para que esse número fosse atingido, o preço de venda de energia posto na simulação foi três vezes maior que o preço de

compra em horário de ponta, que é uma especulação. Esta hipótese não retrata a realidade atual e pode retratar mais um período mais a frente, mas não a conjuntura atual. Quando se trata de negócios e mercado há muita imprevisibilidade, pode ser que um cenário como esse, ou com uma diferença ainda maior entre o preço de venda e compra aconteça. Entretanto, é um cenário pouco provável e não muito atrativo do ponto de vista financeiro.

Tabela 15 – Resultados financeiros (1 euro = 4,5 reais).

VPL (€)	1.527.297,11
Payback (anos)	50
TIR (%)	22,43
Custos de operação no primeiro ano (€)	24.364,45
Custos de manutenção no primeiro ano (€)	7.044,64
Custos de investimento (€)	140.892,85
Entradas de vendas no primeiro ano (€)	46.463,09

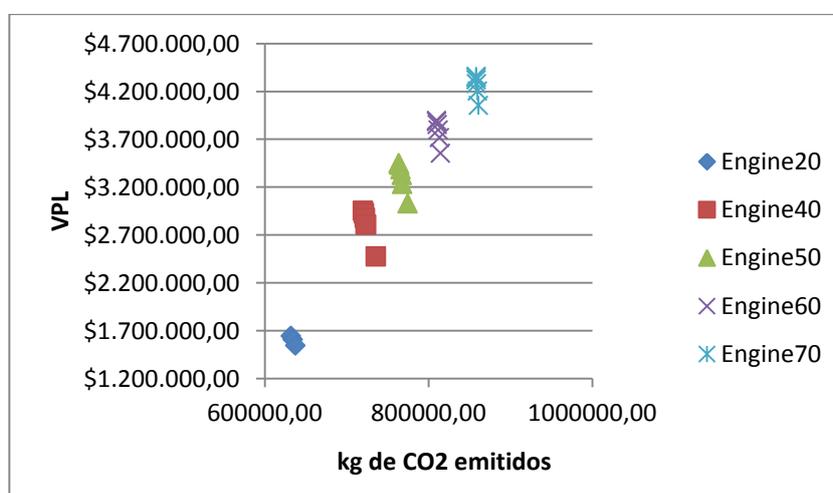
Fonte: O AUTOR (2016).

Neste cenário analisado, foi visto que tecnicamente o sistema poderia anteder as demandas, mas financeiramente não se mostra muito atrativo. Quando se trata de sistemas de abastecimento de energia, outro aspecto também deve ser observado, o ambiental, como o aquecimento global e as mudanças climática que vem acontecendo no nosso planeta, a questão ambiental surge como um parâmetro importante de análise e tomada de decisão. Utilizando o mesmo cenário econômico e demanda, foram selecionados 5 motores e 6 caldeiras auxiliares de potências comercialmente disponíveis para se analisar o impacto financeiro e ambiental com diferentes combinações de potências no caso da reitoria. As potências dos motores analisados foram 20, 40, 50, 60 e 70 kW. Enquanto as caldeiras foram de 45, 50, 60, 75, 100 e 150 kW. Cada motor foi simulado com uma caldeira diferente e foi observado qual o impacto no valor presente líquido e na emissão de CO₂. O resultado está apresentado na Figura 35. Quanto maior a potência somada de motor e caldeira, maior o retorno no investimento. Assim como a emissão de CO₂.

Observa-se que quanto maior o valor da potência do motor maior o valor do VPL, com motores maiores é possível atender a demanda de calor no *chiller* e há uma maior quantidade de eletricidade sobressalente que pode ser vendida para a rede. A energia térmica também pode ser vendida, mas não foi considerado essa hipótese. No caso de instituições públicas não podem ser vendidas diretamente a rede, mas podem ser negociadas com outras instituições públicas, não devendo ultrapassar 1MWh (Araujo, 2015). Por outro lado, o aumento da capacidade do sistema gera uma maior emissão de CO₂ para a atmosfera. Cabe

uma tomada de decisão para situações como essa, o critério de seleção deve ser baseado no financeiro ou no ambiental, algo intermediário é aceitável baseado em legislações ambientais e no tipo de empreendimento que será atendido pelo sistema de fornecimento de energia. No caso de uma universidade pública, parece ser mais interessante uma saída energeticamente limpa e mais eficiente, sem descuidar do fator financeiro. Então, uma nova configuração foi escolhida para ser simulada. Utilizando ou invés de um motor de combustão interna, uma microturbina a gás. Os valores dos dados de entrada financeiro utilizados no TRNSED foram mantidos. Na Tabela 16 estão mostrados os valores financeiros e de emissão de CO₂ para a simulação com as microturbinas.

Figura 35 – VPL versus Emissão de CO₂.



Fonte: O AUTOR (2016).

Primeiro ponto a se observar na tabela, o *payback* dos casos simulados com microturbinas é melhor do que o resultados com motores, possivelmente isso se deve ao sistema de cogeração ser baseado no atendimento de calor ou frio, com possibilidade de exportar eletricidade. Eletricidade neste caso, não é a prioridade para este sistema de cogeração. Os tempos para pagamento do investimento realizado, para o caso da reitoria, com as turbinas são menores do que os motores. Os valores do VPL e da emissão de poluentes apresentam a mesma característica dos motores, são inversamente proporcionais, quanto maior o valor do VPL (maior atrativo financeiro), maior a emissão de CO₂ para a atmosfera, causando novamente uma tomada de decisão para que tipo de índice interessa-se obter melhor performance. E por fim, a emissão de CO₂ com os dois sistemas, com motor ou com microturbina, possuem a mesma ordem de grandeza. Os valores calculados são baseados no conservação de massa dos sistemas e eficiência de cada equipamento, para que seja encontrado o valor de dióxido de carbono no escape do equipamento. A redução das potências

dos equipamentos leva a menor emissão de CO₂, porém também a leva a menor VPL, como pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 – Simulação com microturbina.

	Potência [kW]			
	65	65	30	30
Turbina	65	65	30	30
Caldeira auxiliar	40	30	60	50
Emissões de CO2 [kg]	675.110,6	675.115,5	618600,7	618594,1
VPL (€)	4.305.025,2	4.330.536,2	2.109.659,9	2.135.077,2
Payback (anos)	6	6	13	12
TIR (%)	44,98	46,18	27,66	28,41
Custos de operação no primeiro ano (€)	24.380,01	24.378,71	19.703,03	19.702,45
Custos de manutenção no primeiro ano (€)	8.175,19	8.003,95	7.082,12	6.910,87
Custos de investimento (€)	163.503,81	160.078,99	141.642,31	138.217,49
Vendas no primeiro ano (€)	71.617,31	71.617,32	46.388,43	46.388,43

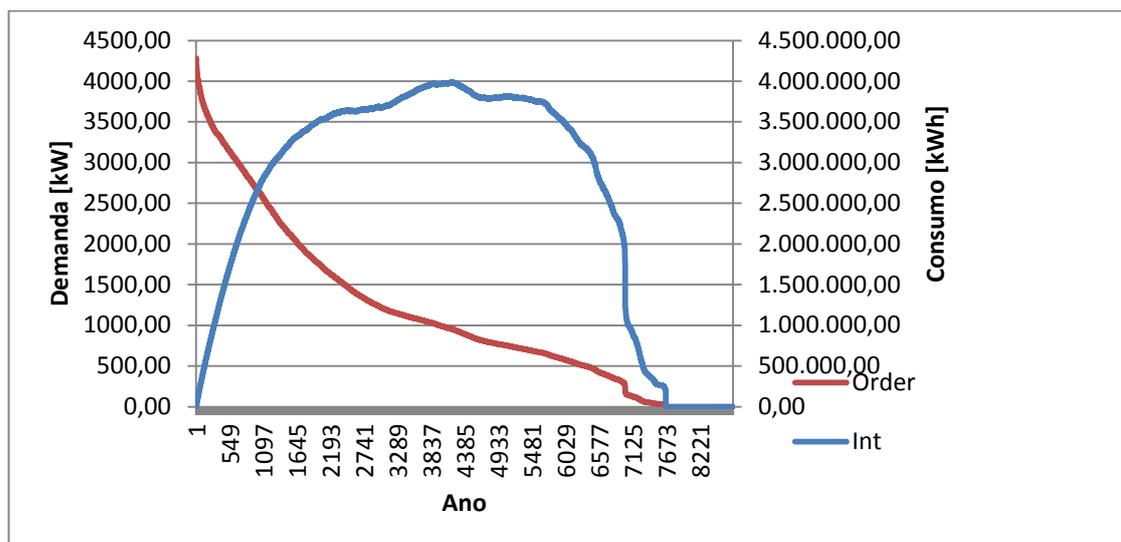
Fonte: O AUTOR (2016).

Os estudos de parte econômica podem ser realizados em um estudo separado, para que possa ser realizado estudo de mercado, tendências de preços de combustíveis e eletricidade, situação econômica do país, importação de equipamentos e outros tipos de taxas e outros impostos, tudo isso pode influenciar no resultado de forma negativa ou positiva. A análise ambiental nesse estudo de caso levou em consideração a quantidade de dióxido de carbono que seria emitida pela planta de cogeração, há outras métricas que também são utilizadas para comparação de estudo de casos ambientais, como a pegada ambiental ou análise de ciclo de vida.

5.2 ANÁLISE DO TRNSEDIT – CONJUNTO DE EDIFÍCIOS

Pensando em um edifício do tipo empresarial, ou conjunto de edifícios que possuíssem uma demanda 20 vezes maior que a da reitoria, ou seja, tivesse um consumo similar ao da universidade completa. Esse estudo tenta saber se para uma demanda maior, estes sistemas de suprimento de energia se tornam atrativos financeiramente para condições atuais e mais realistas. Tendo em vista que os casos com motores pequenos não apresentaram resultados satisfatórios financeiramente, com microturbina já temos resultados mais interessantes financeiramente. O procedimento para dimensionamento dos equipamentos com uma demanda vinte vezes maior do que o da reitoria foi o mesmo utilizado anteriormente, na Figura 36 está mostrada a demanda anual da universidade.

Figura 36 – Demanda e consumo.



Fonte: O AUTOR (2015).

Como pode ser visto na Figura 36, a potência de 500 kW cobre quase 80% da curva de demanda decrescente. Essa é a ordem de grandeza da energia primária necessária para atender aos edifícios. Foi utilizado como motor de referência para o sistema de cogeração o *Jenbacher type 3 model312* da General Electric. Esse motor pode gerar até 633 kW de eletricidade e até 875 kW térmicos. Para geração de calor, foi selecionada uma caldeira de 3500 kW. Um tanque de água quente de 115 m³ está conectado com a saída de água quente da caldeira e do motor. Os equipamentos utilizados na climatização dos ambientes foram: um *chiller* mecânico convencional de 2500 kW e um *chiller* de absorção de 750 kW. Além disso, um tanque de acumulação de água fria de 700 m³.

Para fazer a primeira simulação não foram alterados os valores utilizados na parte econômica do primeiro estudo de caso, assim, seria possível ter um parâmetro de comparação de atratividade financeira do sistema. Na Tabela 17 estão apresentados os valores da primeira simulação com esses equipamentos citados. Como pode ser observado, o tempo de retorno de investimento se assemelha com os valores da Tabela 5.3, onde foi utilizada microturbina a gás e caldeira de pequeno porte. Porém, a ordem o VPL neste caso é maior do que o anterior.

Utilizando a análise de cargas parciais, apresentado na Tabela 18, o circuito primário está sendo subutilizado, o valor encontrado para a carga parcial máxima foi de 0,15. Como o sistema está sobre dimensionado é possível aumentar as vantagens financeiras e diminuir a emissão de poluentes com um sistema menor. Para esta configuração a emissão de CO₂ calculada foi de 6.148.730,51 kg. Bem maior do que a emissão do sistema que utiliza a turbina a gás.

Tabela 17 – Resultados financeiros.

VPL (€)	61.175.846,95
Payback (anos)	7
TIR (%)	39,56
Custos de operação no primeiro ano (€)	415,227,16
Custos de manutenção no primeiro ano (€)	132.228,73
Custos de investimento (€)	2.644.574,60
Entrada de vendas no primeiro ano (€)	1.101.026,96

Fonte: O AUTOR (2016).

Tabela 18 – Cargas parciais máximas.

Carga parcial máxima do circuito primario	0,15
Carga parcial máxima dos chillers	1,08

Fonte: O AUTOR (2016).

Tendo encontrado estes resultados, foi reduzido o tamanho da caldeira de 3500 kW para 3000 kW e o preço de venda de energia foi reduzido quase a metade, para ver o que acontecia com esses parâmetros. E o que pode ser visto na Tabela 19 é uma piora nos parâmetros financeiros e praticamente não há diferença da emissão de poluentes. Neste caso, a emissão calculada foi de 6126413.04 kg por ano, que pode ser observado também pelas cargas máximas parciais. Isso indica que o sistema tem que ser mais bem ajustado as suas necessidades.

Tabela 19 – Resultados financeiros.

VPL (€)	32.828.448,85
Payback (anos)	17
TIR (%)	25,50
Custos de operação no primeiro ano (€)	413.468,43
Custos de manutenção no primeiro ano (€)	123.666,69
Custos de investimento (€)	2.473.333,85
Entrada de vendas no primeiro ano (€)	846.332,76

Fonte: O AUTOR (2016).

Tabela 20 – Cargas parciais máximas.

Carga parcial máxima do circuito primario	0,17
Carga parcial máxima dos chillers	1,08

Fonte: O AUTOR (2016).

Partindo de que os resultados financeiros não são atrativos e o circuito primário está sobre dimensionado, novas configurações com sistemas menores foram simuladas para ver se melhor atendiam as necessidades, com menor emissão de poluentes e mais rentabilidade.

Na Tabela 21 é possível observar que mesmo com preços mais baixos que nas simulações anteriores, é possível ter retorno de investimento com o mesmo ou menor tempo que um sistema menor e com um VPL maior do que o anterior. Os sistemas apresentados na Tabela 21 estão próximos de sistemas ideais para um conjunto de edifícios como os da universidade. Com relação à emissão de poluentes, dimensionar corretamente um sistema, ou seja, usar mais próximo de sua condição nominal ajuda a reduzir a quantidade de CO₂ emitida pelo sistema. Ao que tudo indica um sistema que possa abastecer uma demanda do tamanho da demanda da UFPB pode ser viável financeiramente. Esse tipo de sistema de cogeração atenderia bem, desde que seja dimensionada corretamente para as cargas da universidade. Além disso, é possível reduzir a emissão de CO₂ com o uso dos equipamentos dentro de sua faixa nominal, reduzindo o número de hora de funcionamento do equipamento em cargas parciais.

Tabela 21 – Configurações, resultados ambientais e econômicos.

Configuração	Potência [kW]				
	1	2	3	4	5
Motor	633	600	500	400	350
Caldeira	1000	500	500	500	500
Chiller Compressão	3000	3500	3500	3500	3500
Chiller Absorção	750	750	750	750	800
Emissões de CO ₂ [kg]	6.044.384,32	5.838.025,48	5.223.497,88	4.413.343,09	4.105.762,2
VPL (€)	39.221.226,3	40.493.750,0	41.523.473,0	42.157.592,7	42.279.261,0
Payback (anos)	8	7	6	6	6
TIR (%)	36,24	39,4	41,67	43,26	44,22
Custos de operação no primeiro ano (€)	397.579,21	377.845,22	324.384,10	256.079,84	231.029,83
Custos de manutenção no primeiro ano (€)	93.154,15	86.974,20	82.872,61	79.603,40	77.552,60
Custos de investimento (€)	1.863.083,07	1.739.484,04	1.657.452,24	1.592.068,0	1.551.052,1
Vendas no primeiro ano (€)	844.994,06	826.489,04	771.689,39	698.348,10	669.428,25
Carga parcial máxima do circuito primario	0,28	0,22	0,24	0,72	0,96
Carga parcial máxima dos chillers	1,08	1,06	1,06	1,06	1,05

Fonte: O AUTOR (2016).

5.3 ANÁLISE DO HOSPITAL UNIVERSITÁRIO

O terceiro estudo de caso que foi realizado foi do hospital universitário. As demandas energéticas de um hospital são caracterizadas pela alta qualidade e fornecimento interrompido. No hospital da UFPB a demanda de água quente é suprida por duas caldeiras a diesel e por placas solares. Já a demanda de frio é suprida por equipamentos elétricos. O hospital atende aproximadamente 20000 pessoas e faz 250 cirurgias por mês. Possui uma área de aproximadamente 23 mil m², que estão distribuídos em sete andares e contém 220 leitos. A seguir são apresentadas as formas de suprimento de energia do hospital.

Tabela 22 – Fornecimento de calor.

Consumo anual	kg	Horas diárias de funcionamento	Descrição
BPF	66554	9h	Duas caldeiras para atender água quente no hospital
Diesel	10000	-	Para ignição das caldeiras
GLP	11770	8h	Para cozinha
Energia Solar	2660850	9h	Água quente a 60 graus

Fonte: O AUTOR (2016).

A demanda de frio é suprida por equipamentos elétricos, como mostrado nas Tabelas 23 e 24. Apesar de ter uma central de climatização com rede de distribuição que atravessam todo o hospital, a maioria dos setores não é atendido. A climatização que não é atendida pela central é empregados ar condicionados tipo janela, Split ou centrais autônomas (*self Contained*).

Tabela 23 – Capacidade de Refrigeração do Hospital.

Capacidade	240TR	Total
Fluido	Água	-
N de torres de resfriamento	2	
Compressores	4	30TR
	3	40TR

Fonte: O AUTOR (2016).

As potências dos equipamentos de frio são conhecidas, e não há conhecimento da demanda térmica, como se comporta hora a hora. Ou se os equipamentos funcionam bem, ou a que carga funciona. Por isso, foi feito uma nova abordagem para tentar conhecer as demandas do hospital através da demanda da universidade.

Tabela 24 – Distribuição dos equipamentos de Refrigeração.

Localização	Qte	Capacidade unitária (TR)
Clínica de Obstetrícia	2	7,5
Central de Materiais	1	10
Sala de Aula	2	7,5
CTI	1	12
	1	15
	total	52

Fonte: O AUTOR (2016).

A universidade tem seu calendário de atividades acadêmicas, que influencia diretamente na demanda elétrica. Então, escolhemos 12 dias com características diferentes de ocupação e utilização dos edifícios, no primeiro e no segundo semestre para observar o comportamento da demanda elétrica. Essas datas podem ser observadas na Tabela 25.

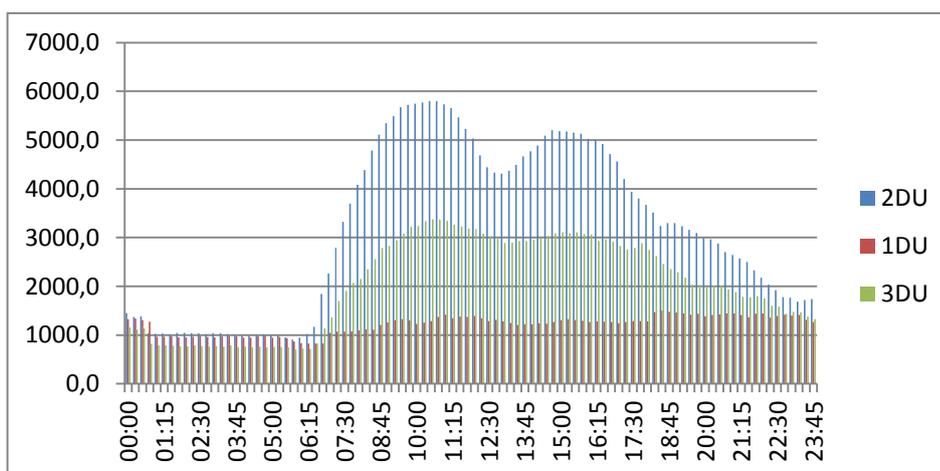
Tabela 25 – Dias característicos.

		Data - 2011
Carnaval	1DU	7-Mar
	1F	5 e 6 de mar
Aulas	2DU	28-Mar
	2F	26 e 27 de mar
Atividades burocráticas	3DU	18-Jul
	3F	16 e 17 de julho
Férias	4DU	5-Aug
	4F	06 e 07 de agosto
Aulas	5DU	29-Aug
	5F	27 e 28 d agosto
Atividades burocráticas	6DU	19-Dec
	6F	17 e 18 de dezembro

Fonte: O AUTOR (2015).

Na Figura 37 pode ser observada a diferença entre um feriado (1DU), dias com aula (2DU) e quando há apenas atividade de escritório (3DU). A questão é que o hospital não pode parar de funcionar, é a única atividade anual constante da universidade. Ou seja, o perfil de um feriado representaria bem o perfil do hospital, porque é a única atividade que funciona em um feriado. Porém, para construir o perfil anual do hospital dois fatores mais devem ser considerados. Ao longo do ano a temperatura e umidade mudam, além disso, há atividades acadêmicas nos períodos de aula.

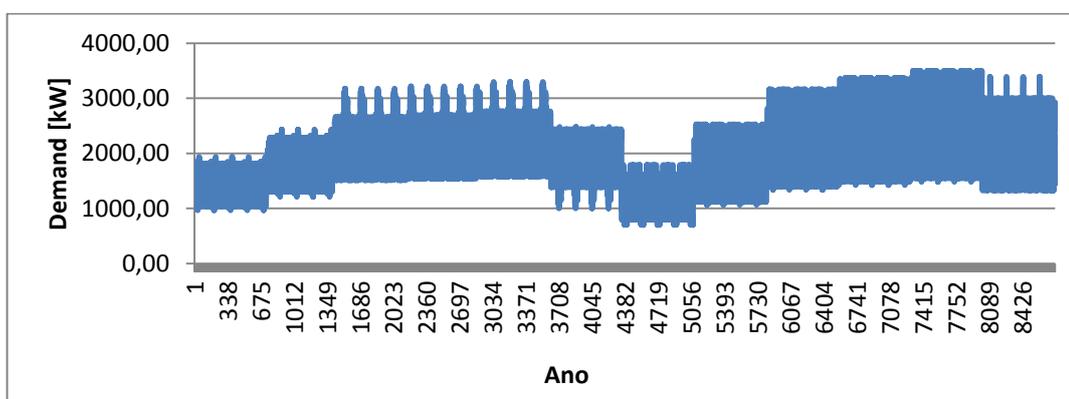
Figura 37 – Demanda elétrica de três dias característicos.



Fonte: O AUTOR (2016).

Baseados na diferença das demandas de cada mês do ano foram calculados constantes de proporcionalidade mensais, que foram multiplicados pelos dias característicos de cada período do ano, conforme a Tabela 25 e assim poder construir a demanda anual.

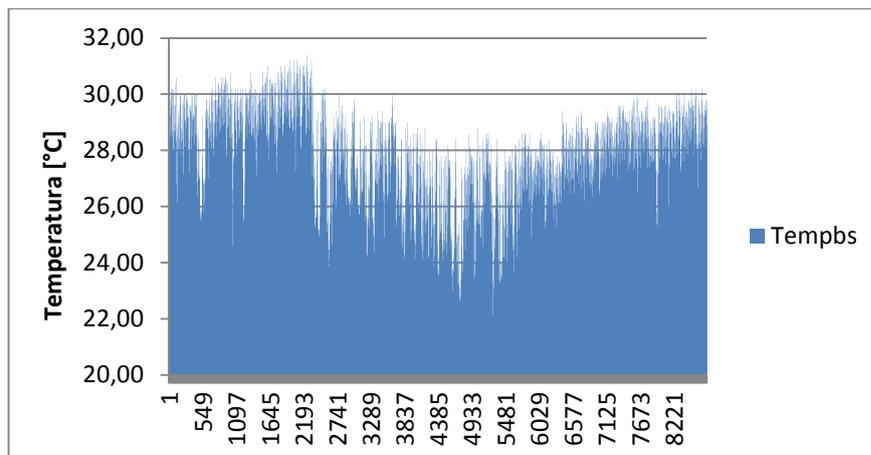
Figura 38 – Estimativa de demanda do Hospital.



Fonte: O AUTOR (2015).

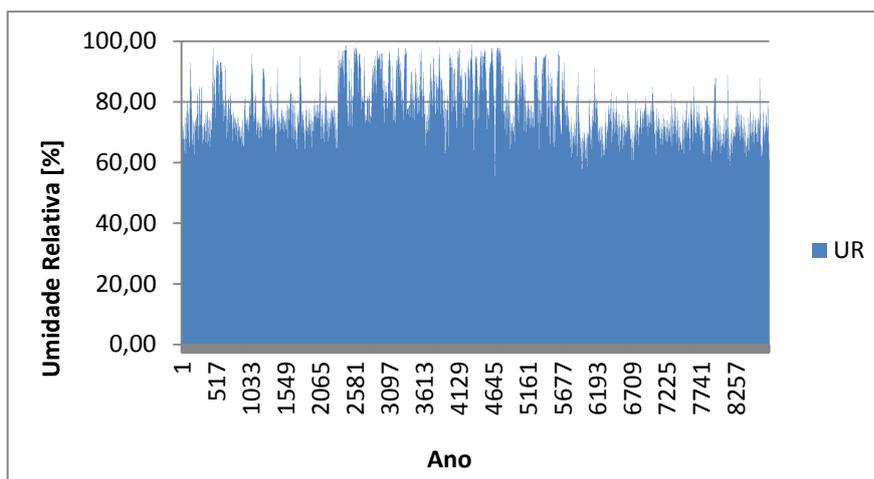
A demanda de calor já está bem atendida por caldeiras e um sistema de placas solares. Porém, a climatização utiliza-se da eletricidade da universidade para gerar o frio necessário para o hospital. A proposta para atender a demanda de frio será com um sistema de cogeração com absorção e sistemas dessecantes para remover a umidade do ar. Para hospitais há que seguir a NBR 7256:2005, que rege a qualidade e a quantidade de ar que deve ser utilizado em um hospital. Portanto, primeiro foi buscado as temperaturas de bulbo seco e umidade relativa da cidade de João Pessoa para o ano de 2011. E estas condições estão apresentadas nas Figuras 39 e 40.

Figura 39 – Temperatura de bulbo seco de João Pessoa em 2011.



Fonte: O AUTOR (2011).

Figura 40 – Umidade relativa de João Pessoa em 2011.



Fonte: O AUTOR (2011).

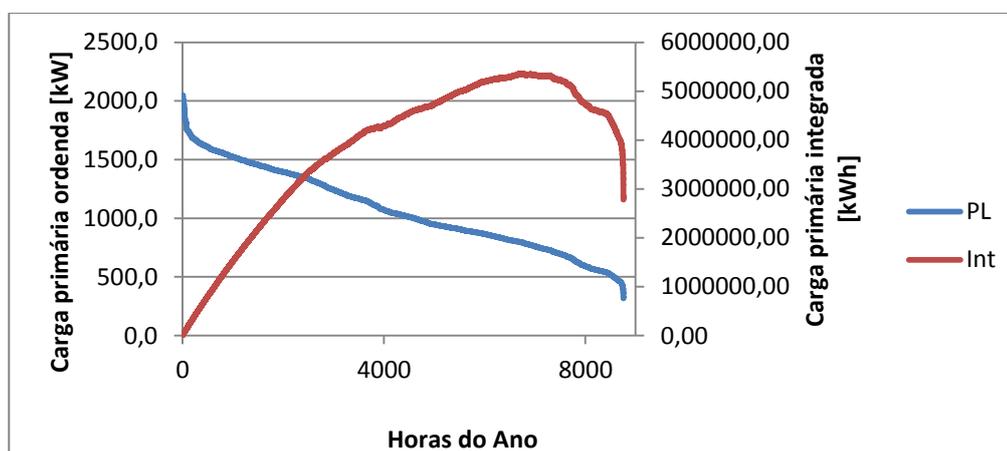
Conhecido as temperaturas e as umidades, foi calculado o dia mais entálpico, ou seja, o dia que é necessário remover mais energia do ar para que atenda as condições de fornecimento de frio mais extremas do ano. A partir desses dados será possível dimensionar a central de cogeração para fornecimento de eletricidade e frio. Poderia ser pensado também num sistema de dessecantes para remoção da umidade ou um sistema de renovação de ar, porém isso vai ficar como trabalho futuro.

Depois conhecida à demanda do hospital e as características dos sistemas, foi iniciado o processo de dimensionamento dos equipamentos que vão suprir a demanda. Em Szklo et al (2004), foi feito um trabalho de levantamento do potencial de utilização de centrais de cogeração para hospitais no Brasil. Nesse artigo, estão relacionados os principais tipos de consumo de energia em um hospital brasileiro e quanto representam percentualmente para

diferentes categorias de hospitais. Esses dados foram utilizados para conseguir separar por tipo de consumo de energia a demanda total do hospital universitário da UFPB. Esse é o pontapé inicial do processo de dimensionamento, conhecer a demanda de frio. A partir daí, determinar a carga primária e selecionar o primeiro equipamento, o motor de combustão interna.

Para o motor utiliza-se a faixa de potência comercial que cobre a maior parte de ano. No caso da Figura 41, seria 500 kW. Com esse valor, foi buscado o motor disponível no mercado, que chegasse mais perto dos valores da demanda. Os motores Jenbacher da GE são fabricados especificamente para cogeração. Com motores assim, é possível extrair uma maior quantidade de energia térmica do equipamento.

Figura 41 – Carga primária.



Fonte: O AUTOR (2015).

O modelo J208, por exemplo, pode fornecer até 330 kW elétricos e 358 kW térmicos. Selecionando este equipamento para ser a máquina motriz do sistema de cogeração, podemos selecionar o equipamento de climatização. O principal equipamento de climatização selecionado é o *chiller* de absorção. O equipamento selecionado foi baseado na capacidade de recuperação de calor do motor de combustão interna. Foi calculador que com o motor seria possível alimentar uma máquina de frio de até 75 TR. A partir daí, sabendo o total de carga primária necessária, é possível calcular o tamanho dos equipamentos auxiliares, caldeira e *chiller* de compressão. Os equipamentos selecionados foram: uma caldeira de 1700 kW e um *chiller* de compressão de 1200 kW. Este sistema foi dimensionado e possui características semelhantes ao caso do conjunto de edifícios, possuindo as mesmas ordens de grandezas dos VPL e tempo de retorno de investimento. Bem como, é tecnicamente viável para o hospital universitário.

6 CONCLUSÕES

Os sistemas de ar condicionado são responsáveis por uma porcentagem muito alta da conta de eletricidade de qualquer edifício público no Brasil, especialmente aqueles localizados no Nordeste do Brasil, devido às condições climáticas tropicais, e em particular porque a média anual de umidade relativa e a temperatura do bulbo seco são em torno de 75% e 27°C, respectivamente. Isso leva a uma demanda muito alta de temperaturas baixas, que é atendida pelo uso de sistemas de refrigeração mecânica. Além disso, a eletricidade consumida pela iluminação, equipamentos de escritório e de laboratório, etc., deve ser levada em consideração. A fim de reduzir o uso direto de eletricidade da empresa elétrica local na universidade, foi proposto um sistema de cogeração que levou em consideração a análise técnica, financeira e ambiental. A demanda de eletricidade e refrigeração pode ser fornecida total ou parcialmente pelos sistemas analisados neste estudo. A avaliação de diferentes casos de sistemas de cogeração (motores de combustão interna, equipamentos de microturbinas, caldeiras térmicas e resfriadores mecânicos e de absorção) foi realizada por meio de simulações no TRNEdit. Um sistema de cogeração (demanda de eletricidade e resfriamento) foi modelado, simulado e analisado e os resultados mostraram que energeticamente este sistema atenderia a eletricidade e também as necessidades de conforto térmico do prédio da reitoria da UFPB.

Além de testar o sistema com um motor de combustão interna, também foi testado um sistema de microturbinas a gás, e os resultados mostraram que este tipo de sistema também seria tecnicamente viável e ambientalmente amigável, e seria melhor do que usar um motor de combustão interna.

Do ponto de vista financeiro, o sistema de cogeração proposto com um motor de combustão para satisfazer as exigências elétricas e de refrigeração da reitoria não era atraente, uma vez que os valores de retorno só seriam alcançados após cerca de 40 a 50 anos. Apenas os sistemas de cogeração usando a microturbina a gás de 65kW provaram ser financeiramente viáveis, uma vez que o tempo de retorno foi de cerca de 6 anos. Observou-se também que quanto maior a potência gerada no motor e na caldeira, maior o VPL e maior a emissão de poluentes.

Quanto ao estudo de caso II - o conjunto de edifícios, onde a universidade assumiu que estes edifícios teriam o perfil de consumo da reitoria e onde todos os equipamentos foram redimensionados para atender as demandas de energia elétrica e refrigeração, os resultados

mostraram que esta alternativa era técnica e financeiramente viável, uma vez que o tempo de retorno era de 6 a 8 anos.

Quanto ao hospital foi possível dimensionar um sistema tecnicamente viável para abastecimentos das demandas térmicas do edifício, porém devido a falta de mais dados sobre o prédio não foi possível calcular a parte de conforto térmico para o hospital universitário.

6.1 TRABALHOS FUTUROS

- a) Aplicar esta mesma metodologia para o centro de pesquisa do IFPE;
- b) Realizar estudo comparativo de preços de equipamentos no Brasil e exterior;
- c) Comparar um modelo de cogeração proposto para o centro de pesquisa do IFPE com o atual sistema híbrido de placas fotovoltaicas;
- d) Adicionar outras métricas de avaliação de impacto ambiental e emissão de gases poluentes;
- e) Ampliar as opções de equipamentos que pode anteder as demandas de eletricidade, frio e calor;
- f) Analisar do ponto de vista de conforto térmico e viabilidade técnico financeira de sistemas dessecantes;
- g) Ampliar o banco de dados de equipamentos funcionando a carga parcial;
- h) Realizar análise de sensibilidade com o banco de dados ampliado;
- i) Patentear no Brasil o TRSNEdit.

REFERÊNCIAS

AKBARI, A. D.; MAHMOUDI, S.M.S. Thermo-economic performance and optimization of a novel cogeneration system using carbon dioxide as working fluid. **Energy Conversion and Management**. v. 145, 2017. p. 265-277. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417304223>. Acesso em: 10 ago. 2018.

ANGRISANI, G.; AKISAWA, A.; MARRASSO, E.; ROSELLA, C.; SASSO, M. Performance assessment of cogeneration and trigeneration systems for small scale applications. **Energy Conversion and Management** v. 125, 2016. p. 194-208. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.03.092. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416302394>. Acesso em: 20 ago. 2017.

ARAÚJO, M. M. D. **Estudo termodinâmico e econômico de sistemas para cogeração distribuída em campus universitário**. 2015. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Centro de Tecnologia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

BADAMI, M.; CHICCO, G.; PORTORARO, A.; ROMANIELLO, M. Micro-multigeneration prospects for residential applications in Italy. **Energy Conversion and Management**. v. 166, 2018. p. 23–36. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303339>. Acesso em: 15 dez. 2018.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxas de câmbio**. Brasília, DF, 2018. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/taxas/batch/taxas.asp?id=txdolar>. Acesso em: 25 jan. 2018.

BARIGOZZI, G.; PERDICHIZZI, A.; GRITTI, C.; GUAIATELLI, I. Techno-economic analysis of gas turbine inlet air cooling for combined cycle power plant for different climatic conditions. **Applied Thermal Engineering**. v. 82, 2014. p. 57-67. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2015.02.049. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S135943111500157X>. Acesso em: 20 mar. de 2017.

BARMA, M.C.; RIAZ, M.; SAIDUR, R.; LONG, B.D. Estimation of thermoelectric power generation by recovering waste heat from Biomass fired thermal oil heater. **Energy Conversion and Management**. v. 98, 2015. p. 303-313. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.03.103. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415003295>. Acesso em: 22 ago. 2018.

BASRAWI, F.; IBRAHIM, T.K.; HABIB, K.; YAMADA, T.; IDRIS, D.M.N.D. Techno-economic performance of biogas-fueled micro gas turbine cogeneration systems in sewage treatment plants: Effect of prime mover generation capacity. **Energy**. v. 124, 2017. p. 238-248. Doi: 10.1016/j.energy.2017.02.066. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217302414>. Acesso em: 30 mar. 2019.

BAZZO, E.; CARVALHO, A.N.; MATELLI, J.A. Experimental results and thermodynamic analysis of a natural gas small scale cogeneration plant for Power and refrigeration purposes. **Applied Thermal Engineering**. v. 58, 2013. p. 264-272. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2013.04.041. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431113003128>. Acesso em: 15 jun. 2016.

BEN – Brazilian Energy Balance. Empresa de Pesquisa Energética - EPE, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/en/publications/publications/brazilian-energy-balance>. Acesso em: 25 jun. 2018.

BRANDÃO, R.; MARCONDES, M. P.; BENEDETTO, G. S.; GONÇALVES, J. C. S.; DUARTE, D. H. S.; RAMOS, J. O. The new research centre of the Brazilian Petroleum Company in Rio de Janeiro, Brazil: The achievements in the thermal performance of air-conditioned buildings in the tropics. **Energy and Buildings**. v. 40, 2008. p. 1917–1930. Doi:10.1016/j.enbuild.2008.04.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808000960>. Acesso em: 10 dez. 2015.

BRIZI, F.; SILVEIRA, J.L.; DESIDERI, U.; DOS REIS, J.A.; TUNA, C.E.; LAMAS, W.Q. Energetic and economic analysis of a Brazilian compact cogeneration system: Comparison between natural gas and biogas. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 38, 2014. p. 193-211. Doi: 10.1016/j.rser.2014.05.088. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004225>. Acesso em: 13 jul. 2015.

CABRAL, J.A.; LEGEY, L.F.L.; CABRAL, M.V.F. Electricity consumption forecasting in Brazil: A spatial econometrics approach. **Energy**. v. 126, 2017. p. 124-131. Doi: 10.1016/j.energy.2017.03.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544217303638>. Acesso em: 15 abr. 2019.

CALDERA M.; CORGNATI S. P.; FILIPPI M. Energy demand for space heating through a statistical approach: application to residential buildings. **Energy Build**. v. 40, 2008. p. 1972-1983. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808001102>. Acesso em: 13 jun. 2016.

CARVALHO, M.M.Q.; LA ROVERE, E.L.; GONÇALVES, A.C.M. Analysis of variables that influence electric energy consumption in commercial buildings in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 14, 2010. p. 3199–3205. Doi: 10.1016/j.rser.2010.07.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032110001899>. Acesso em: 15 mar. 2015.

CATALINA T.; VIRGONE J.; BLANCO E. Development and validation of regression models to predict monthly heating demand for residential buildings. **Energy Build**. v. 40, 2008. p.1825-1832. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778808000844>. Acesso em: 14 jun. 2016.

CAVALCANTE, A.W.A.; DOS SANTOS, C.A.C.; OCHOA A.A.V. Thermodynamic Analysis Of An Energy HighPerformance Systems. **IEEE Latin America Transactions** v. 15, 2017. p. 454-461. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7867595/>. Acesso em: 17 mai. 2019.

CHAUHAN, S.S.; RAIPUT, S.P.S. Thermodynamic analysis of the evaporative-vapour compression based combined air conditioning system for hot and dry climatic conditions. **Journal of Building Engineering**. v. 4, 2015. p. 200-208. Doi: 10.1016/j.job.2015.09.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710215300310>. Acesso em: 15 jun. 2018.

CHEN, B.; XU, H.; SUN, Q.; ZHANG, H.; TAN, P.; CAI, W.; HE, W.; NI, M. Syngas/power cogeneration from proton conducting solid oxide fuel cells assisted by dry methane reforming: A thermal-electrochemical modelling study. **Energy Conversion and Management**. v. 167, 2018. p. 37-44. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.078. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418304266>. Acesso em: 15 fev. 2019.

CHUNG, M. A.; HWA-CHOON, P. Comparison of building energy demand for hotels, hospitals, and offices in Korea. **Energy**. v. 92, 2015. p. 383e393. Doi: 10.1016/j.energy.2015.04.016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544215004442>. Acesso em: 10 abr. 2017.

CHUNG, M.; PARK., H.C.; COIMBRA, C.F.M. Estimation of the building energy loads and LNG demand for a cogeneration-based community energy system: A case study in Korea. **Energy Conversion and Management**. v. 87, 2014. p. 1010-1026. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.07.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414006979>. Acesso em: 15 jul. 2016.

CORTON, M.L.; ZIMMERMANN, A.; PHILLIPS, M.A. The low cost of quality improvements in the electricity distribution sector of Brazil. **Energy Policy**. v. 97, 2016. p. 485-493. Doi: 10.1016/j.enpol.2016.07.052. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151630413X>. Acesso em: 15 jul. 2018.

DABWAN, Y.N.; MOKHEIMER, E.M.A. Optimal integration of linear Fresnel reflector with gas turbine cogeneration power plant. **Energy Conversion and Management**. v. 148, 2017. p. 830-843. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.06.057. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417306052>. Acesso em: 15 jun. 2018.

DHAMNEYA, A.K.; RAIPUT, S.P.S.; SINGH, A. Theoretical performance analysis of window air conditioner combined with evaporative cooling for better indoor thermal comfort and energy saving. **Journal of Building Engineering**. v. 17, 2018. p. 52-64. Doi: 10.1016/j.job.2018.01.012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710217306721>. Acesso em: 15 mai. 2019.

EDWARD H. B.; ROBERTO L. Developing energy consumption benchmarks for buildings: Bankbranches in Brazil. **Energy and Buildings**. v. 82, 2014. p. 82–91. Doi: 10.1016/j.enbuild.2014.07.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778814005659>. Acesso em: 17 out. 2016.

ELGENDY, E.; MELIKE, M.; FATOUH, M. Experimental assessment of a split air conditioner working with R-417A under different indoor and outdoor conditions. **International Journal of Refrigeration**. v. 85, 2018. p. 268-281. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2017.10.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140700717303894>. Acesso em: 17 mai. 2018.

ESTEVEZ, G.R.T.; OLIVEIRA, F.L.C.; ANTUNES, C.H.; SOUZA, R.C. An overview of electricity prepayment experiences and the Brazilian new regulatory framework. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 54, 2016. p. 704-722. Doi: 10.1016/j.rser.2015.10.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115010680>. Acesso em: 17 mai. 2019.

FARIA, D.M.C.; RAMOS, D.S. Economic Regulation of Brownfield Projects: The Brazilian Hydro Power Plants Case. **IEEE Latin America Transactions**. v. 14, 2016. p. 4733-4740. Doi: 10.1109/TLA.2016.7817004. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7817004>. Acesso em: 07 nov. 2018.

FERREIRA, A.; KUNH, S.S.; FAGNANI, K.C.; DE SOUZA, T.A.; TONEZER, C.; DOS SANTOS, G.R.; COIMBRA-ARAÚJO, C.H. Economic overview of the use and production of photovoltaic solar energy in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 81, 2018. p. 181-191. Doi: 10.1016/j.rser.2017.06.102. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117310389>. Acesso em: 08 mai. 2019.

FRANCO, A.; VERSACE, M. Multi-objective optimization for the maximization of the operating share of cogeneration system in District Heating Network. **Energy Conversion and Management**. v. 139, 2017. p. 33-44. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.02.029. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417301334>. Acesso em: 07 abr. 2019.

GARCEZ, C.G. The low cost of quality improvements in the electricity distribution sector of Brazil. **Utilities Policy**. v. 49, 2017. p. 104-115. Doi: 10.1016/j.enpol.2016.07.052. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030142151630413X>. Acesso em: 10 jun. 2019.

GIANFRANCO C.; PIERLUIGI M. Matrix modelling of small-scale trigeneration systems and application to operational optimization. **Energy**. v. 34, 2009. p. 261–273. Doi: 10.1016/j.energy.2008.09.011. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544208002429>. Acesso em: 20 jul. 2015.

GIMELLI, A.; MUCCILLO, M.; SANNINO, R. Optimal design of modular cogeneration plants for hospital facilities and robustness evaluation of the results. **Energy Conversion and Management**. v. 134, 2017. p. 20-31. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.027. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041631113X>. Acesso em: 15 jan. 2019.

GOMES, R. A. E. S. **Modelagem Computacional de Caldeiras de Recuperação Térmica**. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Departamento de Energia, Universidade Estadual De Campinas, Campinas. Disponível em: <http://repositorio.unicamp.br/handle/REPOSIP/265345>. Acesso em: 10 dez. 2015.

GOYAL, R.; SHARMA, D.; SONI, S.L.; GUPTA, P.K.; JOHAR, D. An experimental investigation of CI engine operated micro-cogeneration system for power and space cooling. **Energy Conversion and Management**. v. 89, 2015. p. 63-70. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.09.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414008292>. Acesso em: 10 jan. 2016.

GRANDERSON J.; PRICE P. N. Development and application of a statistical methodology to evaluate the predictive accuracy of building energy baseline models. **Energy March**. v. 66, 2014. p. 981-990. Doi: 10.1016/j.energy.2014.01.074. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214000966>. Acesso em: 10 nov. 2016.

HE., W.F.; HAN, D.; XU, L.N.; YUE, C.; PU, W.H. Performance investigation of a novel water–power cogeneration plant (WPCP) based on humidification dehumidification (HDH) method. **Energy Conversion and Management**. v. 110, 2016. p. 184-191. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041501119X>. Acesso em: 05 abr. 2018.

HENG, S.Y.; ASAKO, Y.; SUWA, T.; TAN, L.K.; SHARIFMUDDIN, N.B.; KAMADINATA, J.O. Performance of a small-scale solar cogeneration system in the equatorial zone of Malaysia. **Energy Conversion and Management**. v. 184, 2019. p. 127-138. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.01.059. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419301050>. Acesso em: 10 jun. 2019.

HIRSCHFELD H. **Engenharia Econômica e Análise de Custos**. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas, 2007.

HOSSEINPOUR, J.; SADEGHI, M.; CHITSAZ, A.; RANJBAR, F.; ROSEN, M.A. Exergy assessment and optimization of a cogeneration system based on a solid oxide fuel cell integrated with a Stirling engine. **Energy Conversion and Management**. v. 143, 2017. p. 448-458. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417303242>. Acesso em: 10 out. 2018.

HUNT, J.D.; STILPEN, D.; DE FREITAS, M.A.V. A review of the causes, impacts and solutions for electricity supply crises in Brazil. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 88, 2018. p. 208-222. Doi: 10.1016/j.rser.2018.02.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032118300613>. Acesso em: 10 jan. 2019.

HYONUKSEO, A.; JINIL S. A.; SI-DOEK O. A.; HOO-SUK O. B., HO-YOUNG K. B. Economic optimization of a cogeneration system for apartment houses in Korea. **Energy and Buildings**. v.40, 2008. p. 961–967. Doi: 10.1016/j.enbuild.2007.08.002. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877880700206X>. Acesso em: 10 mai. 2015.

INMET. Disponível em:

http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/gera_serie_txt_mensal.php?&mRelEstacao=82798&btnProcesso=serie&mRelDtInicio=01/01/2011&mRelDtFim=31/12/2011&mAtributos
Acesso em: 21 jun. 2018.

JIANG, L.; LU, H.; WANG. R.; WANG, L.; GONG, L.; LU, Y.; ROSKILLY, A.P. Investigation on an innovative cascading cycle for power and refrigeration cogeneration. **Energy Conversion and Management**. v. 145, 2017. p. 20-29. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.086. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041730403X>. Acesso em: 10 nov. 2018.

JING, X.; ZHENG, D. Effect of cycle coupling-configuration on energy cascade utilization for a new power and cooling cogeneration cycle. **Energy Conversion and Management**. v. 78, 2014. p. 58-64. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006730>. Acesso em: 10 mar. 2017.

KALINA, J. Equipment sizing in a coal-fired municipal heating plant modernisation project with support for renewable energy and cogeneration technologies. **Energy Conversion and Management**. v. 86, 2014. p. 1050-1058. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.06.079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414006049>. Acesso em: 10 abr. 2017.

KLEIN, B. C.; CHAGAS, M. F.; JUNQUEIRA, T. L.; REZENDE, M. C. A. F.; CARDOSO, T. DE F.; CAVALETT, O.; BONOMI, A. Techno-economic and environmental assessment of renewable jet fuel production in integrated Brazilian sugarcane biorefineries. **Applied Energy**. v. 209, 2018. p. 290 – 350. Doi: 10.1016/j.apenergy.2017.10.079. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S030626191731499X>. Acesso em: 10 mai. 2019.

KOLDLAR, M.A.; MAHMOUDI, S.M.S. Exergeoeconomic analysis and optimization of a novel cogeneration system producing power and refrigeration. **Energy Conversion and Management**. v. 134, 2017. p. 208-220. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.12.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416310858>. Acesso em: 10 nov. 2018.

KOUTA, A.; AL-SULAIMAN, F.; ATIF, M.; MARSHAD, S.B. Entropy, exergy, and cost analyses of solar driven cogeneration systems using supercritical CO₂ Brayton cycles and MEE-TVC desalination system. **Energy Conversion and Management**. v. 115, 2016. p. 253-264. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.02.021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416300450>. Acesso em: 15 fev. 2017.

LEE W. S.; KUNG C. K. Using climate classification to evaluate building energy performance. *Energy* March 2011;36(3):1797e801. Doi: 10.1016/j.energy.2010.12.034. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544210007243>. Acesso em: 12 dez. 2015.

LELE, A.F.; KUZNIK, F.; OPEL, O.; RUCK, W.K.L. Performance analysis of a thermochemical based heat storage as an addition to cogeneration systems. **Energy Conversion and Management**. v. 106, 2015. p. 1327-1344. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.10.068. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890415009905>. Acesso em: 10 abr. 2017.

LI, S.; GAO, L.; JIN, H. Life cycle energy use and GHG emission assessment of coal-based SNG and power cogeneration technology in China. **Energy Conversion and Management**. v. 112, 2016. p. 91-100. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.12.075. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041501184X>. Acesso em: 10 dez. 2017.

LI, S.; Jin, H.; Gao, L.; Zhang, X.; Ji, X. Techno-economic performance and cost reduction potential for the substitute/synthetic natural gas and power cogeneration plant with CO₂ capture. **Energy Conversion and Management**. v. 85, 2014. p. 875-887. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.071. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414000442>. Acesso em: 10 dez. 2015.

LI, W.; FU, L.; YUAN, W.; X., ZHENG, Z.; LI, Y. Energy efficiency analysis of condensed waste heat recovery ways in cogeneration plant. **Energy Conversion and Management**. v. 101, 2015. p. 616-625. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.06.017. Disponível em: <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.elsevier-edf0c633-0d90-3033-9c1f-6a940fd5e8c0>. Acesso em: 11 dez. 2016.

LIANG, Y.; SHU, G.; TIAN, H.; WEI, H.; LIANG, X.; LIU, L.; WANG, X. Theoretical analysis of a novel electricity-cooling cogeneration system (ECCS) based on cascade use of waste heat of marine engine. **Energy Conversion and Management**. v. 85, 2014. p. 888-894. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.12.070. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414000430>. Acesso em: 11 dez. 2016.

LOPES, D. C.; NETO, A. J. S.; MENDES, A. A.; PEREIRA, D. T. V. Economic feasibility of biodiesel production from Macauba in Brazil. **Energy Economics**. v. 40, 2013. p. 819 -824. Doi: 10.1016/j.eneco.2013.10.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414000430>. Acesso em: 11 dez. 2016.

MAGNANI F. S.; DA SILVA, P. P.; GUERRA, M. R.; HORNSBY, E. M. Adaptability of optimized cogeneration systems to deal with financial changes occurring after the design period. **Energy and Buildings**. v. 58, 2013. p. 183–193. Doi: 10.1016/j.enbuild.2012.11.023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778812006263>. Acesso em: 10 dez. 2015.

MAGO, P.J.; CHAMRA, L.M. Analysis and optimization of CCHP systems based on energy, economical, and environmental considerations. **Energy and Buildings**. v. 41, 2009. p. 1099–1106. Doi: 10.1016/j.enbuild.2009.05.014. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778809001157>. Acesso em: 13 fev. 2015.

MOHAMMADI, K.; MCGOWAN, J.G. Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a novel power/cooling cogeneration system for low-grade heat sources. **Energy Conversion and Management**. v. 158, 2018. p. 460–475. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303339>. Acesso em: 13 abr. 2019.

MOHAMMED, J.A.K.; MOHAMMED, F.M.; JABBAR, M.A.S. Investigation of high performance split air conditioning system by using Hybrid PID controller. **Applied Thermal Engineering**. v. 129, 2018. p. 1240–1251. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.10.113. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431117319002>. Acesso em: 10 fev. 2019.

NIA, M.H.; NEJAD, A.A.; GOUDARZI, A.M.; VALIZADEH, M., SAMADIAN, P. Cogeneration solar system using thermoelectric module and Fresnel lens. **Energy Conversion and Management**. v. 84, 2014. p. 305–310. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.04.041. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414003458>. Acesso em: 13 nov. 2017.

OCHOA, A.A.V.; DUTRA, J.C.C.; HENRÍQUEZ, J.R.G.; DOS SANTOS, C.A.C. Techno-economic and Exergoeconomic Analysis of a micro cogeneration system for a residential use. **Acta Technology Scientiarum**. v. 38, 2016. p. 327–338. Doi: 10.4025/actascitechnol.v38i3.28752. Disponível em: <https://www.redalyc.org/service/redalyc/downloadPdf/3032/303258327030/7>. Acesso em: 10 nov. 2018.

OCHOA, A.A.V.; DUTRA, J.C.C.; HENRÍQUEZ, J.R.G.; DOS SANTOS, C.A.C. Dynamic study of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O. **Energy Conversion and Management**. v. 108, 2016. p. 30–42. Doi: 10.1016/j.enconman.2015.11.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689041501016X>. Acesso em: 13 out. 2015.

OCHOA, A.A.V.; DUTRA, J.C.C.; HENRÍQUEZ, J.R.G.; DOS SANTOS, C.A.C.; ROHATGI, J. The influence of the overall heat transfer coefficients in the dynamic behavior of a single effect absorption chiller using the pair LiBr/H₂O. **Energy Conversion and Management**. v. 136, 2017. p. 270-282. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.01.020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417300201>. Acesso em: 15 abr. 2018.

OCHOA, A.A.V.; DUTRA, J.C.C.; HENRÍQUEZ, J.R.G.; ROHATGI, J. Energetic and exergetic study of a 10RT absorption chiller integrated into a microgeneration system. **Energy Conversion and Management**. v. 88, 2014. p. 545-553. Doi: 10.1016/j.enconman.2014.08.064. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890414007882>. Acesso em: 13 out. 2015.

OLIVEIRA, R. D.; DE SOUZA, R. V. G.; MAIRINK, A. J. M.; RIZZI, M. T. G.; DA SILVA, R. M. Thermal Comfort for users according to the Brazilian Housing Buildings Performance Standards. **Energy Procedia**. v. 78, 2015. p. 2923-2928. Doi: 10.1016/j.egypro.2015.11.668. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215024005>. Acesso em: 13 fev. 2016.

ONOVWIONAA, H.I.; UGURSAL, V.I. Residential cogeneration systems: review of the current technology. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 10, 2006. p. 389–431. Doi: 10.1016/j.rser.2004.07.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032104001340>. Acesso em: 05 abr. 2018.

ORTIGA, J. **Modelling environment for design and optimisation of energy polugeneration systems**. 2010. Doctoral Thesis – Universitat Rovira i Virgili, Tarragona.

ORTIGA, J.; BRUNO, J.C.; CORONAS, A. Selection of typical days for the characterisation of energy demand in cogeneration and trigeneration optimisation models for buildings. **Energy Conversion and Management**. v. 52, 2011. p. 1934–1942. Doi : 10.1016/j.enconman.2010.11.022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890410005315>. Acesso em: 10 abr. 2015.

PBGAS. Disponível em: <http://www.pbgas.com.br/>. Acesso em: 09 jun. 2018.
PEREIRA, M.G.; CAMACHO, C.F.; FREITAS, M. A. V., DA SILVA, N. F. The renewable energy market in Brazil: Current status and potential. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 16, 2012. p. 3786-3802. Doi: 10.1016/j.rser.2012.03.024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112002079>. Acesso em: 08 dez. 2016.

PIACENTINO, A.; CARDONA, F. EABOT – Energetic analysis as a basis for robust optimization of trigeneration systems by linear programming. **Energy Conversion and Management**. v. 49, 2008. p. 3006–3016. Doi: 10.1016/j.enconman.2008.06.015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890408002392>. Acesso em: 15 jul. 2015.

Plano Nacional Energético (PNE) – 2030. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/>, Acesso em: 18 abr. 2016.

PRAZ, A.G.C. Evaluation of Air Conditioning Replacement Program in Mexico: Energy, Economic and Environmental Impacts. 2011. Dissertation (Master of Environmental Management) – Nicholas School of the Environment, Duke University, North Carolina. PROCEL RESULTADOS – 2017 (ANO BASE 2016). Disponível em: http://www.procelinfo.com.br/resultadosprocel2017/docs/rel_procel2017_web.pdf. Acesso em: 09 jul. 2019.

RIVAROLO, M.; GRECO, A.; MASSARDO, A.F. Thermo-economic optimization of the impact of renewable generators on poly-generation smart-grids including hot thermal storage. **Energy Conversion and Management**. v. 65, 2013. p. 75-83. Doi: 10.1016/j.enconman.2012.09.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006195>. Acesso em: 19 abr. 2015 .

ROSATO, A., SIBILIO, S., SCORPIO, M. Dynamic performance assessment of a residential building-integrated cogeneration system under different boundary conditions. Part II: Environmental and economic analyses. **Energy Conversion and Management**. v. 79, 2014. p. 749-770. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.09.058. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006195>. Acesso em: 10 jan. 2016.

ROSATO, A.; SIBILIO, S.; SCORPIO, M. Dynamic performance assessment of a residential building-integrated cogeneration system under different boundary conditions. Part I: Energy analysis. **Energy Conversion and Management**. v. 79, 2014. p. 731-748. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.001. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006213>. Acesso em: 10 jan. 2016.

SAFDER, U.; IFAEI, P.; YOO, C. Multi-objective optimization and flexibility analysis of a cogeneration system using thermorisk and thermoeconomic analyses. **Energy Conversion and Management**. v. 166, 2016. p. 602-636. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303650>. Acesso em: 15 fev. 2017.

SHOKATI, N.; RANJBAR, F.; YARI, M. A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, Part 1 simulation. **Energy Conversion and Management**. v. 158, 2018. p. 437-459. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.12.086. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417312451>. Acesso em: 13 mai. 2019.

SHOKATI, N.; RANJBAR, F.; YARI, M. A comprehensive exergoeconomic analysis of absorption power and cooling cogeneration cycles based on Kalina, Part 2: Parametric study and optimization. **Energy Conversion and Management**. v. 161, 2018. p. 74-103. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.01.080. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418300931>. Acesso em: 10 mar. 2019.

SILVA, H.C.N.; DUTRA, J.C.C.; COSTA, J.A.P.; OCHOA, A.A.V.; DOS SANTOS, C.A.C.; ARAÚJO, M.M.D. Modeling and simulation of cogeneration systems for buildings on a university campus in Northeast Brazil – a case study. **Energy Conversion and Management**. v. 186, 2019. p. 334-348. Doi: 10.1016/j.enconman.2019.02.062. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302535>. Acesso em: 13 jun. 2019.

SILVEIRA, J.L.; LAMAS, W.D.Q.; TUNA, C.E.; VILLELA, I.A.C.; MIRO, L.S. Ecological efficiency and thermoeconomic analysis of a cogeneration system at a hospital. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2012;16:2894– 2906. Doi: 10.1016/j.rser.2012.02.007. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032112001001>. Acesso em: 10 mar. 2016.

SONAR, D.; SONI, S.L.; SHARMA, D. Micro-trigeneration for energy sustainability: Technologies, tools and trends. **Applied Thermal Engineering**. v. 71, 2014. p. 790 -796. Doi: 10.1109/TLA.2017.7867595. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890419302535>. Acesso em: 10 abr. 2016.

Sorgato, M. J. **Desempenho térmico de edificações residenciais unifamiliares ventiladas naturalmente**. 2009. Dissertação (Mestrado Engenharia Civil) – Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SZKLO, A. S.; SOARES, J. B.; TOLMASQUIM, M. T. Energy Consumption indicators and CHP technical potential in Brazilian hospital sector. **Energy Conversion and Management** 2004;45:2075–2091. Doi: 10.1016/j.enconman.2003.10.019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S019689040300325X>. Acesso em: 15 jun. 2015.

THOMAS, N. S.; MARTIN, S.; FAI, W. K. Using genetic algorithms and linear regression analysis for private housing demand forecast. **Build Environ**. v. 43, 2008. p. 1171-1184. Doi: 10.1016/j.buildenv.2007.02.017. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132307000923>. Acesso em: 10 abr. 2017.

TIAN, W.; JITIAN, S.; LI, Z. Spatial regression analysis of domestic energy in urban areas. **Energy**. v. 76, 2014. p. 629-640. Doi: 10.1016/j.energy.2014.08.057. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214009931>. Acesso em: 07 dez. 2016.

TUBELO, R.; RODRIGUES, L.; GILLOTT, M.; SOARES, J.C.G. Cost-effective envelope optimisation for social housing in Brazil's moderate climates zones. **Building and Environment**. v. 133, 2018. p. 213-227. Doi: 10.1016/j.buildenv.2018.01.038. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132318300507>. Acesso em: 20 de maio de 2019.

VANDEWALLE, J.; DHAESELEER, W. The impact of small scale cogeneration on the gas demand at distribution level. **Energy Conversion and Management**. v. 78, 2014. p. 137-150. Doi: 10.1016/j.enconman.2013.10.005. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890413006250>. Acesso em: 07 mar. 2017.

VECCHI, R.; CANDIDO, C.; DEAR, R.; LAMBERTS, R. Thermal comfort in office buildings: Findings from a field study in mixed-mode and fully-air conditioning environments under humid subtropical conditions. **BUILDING AND ENVIRONMENT**. v. 123, 2017. p. 672-683. Doi: 10.1016/j.buildenv.2017.07.029. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132317303281>. Acesso em: 14 abr. 2018.

VERBAI Z.; LAKATOS A.; KALMAR F. Prediction of energy demand for heating of residential buildings using variable degree day. **Energy**. v. 76, 2014. p. 780-787. Doi: 10.1016/j.energy.2014.08.075 Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214010299>. Acesso em: 10 nov. 2017.

VILLAREAL, M.J.C.; MOREIRA, J.M.L. Household consumption of electricity in Brazil between 1985 and 2013. **Energy Policy**. v. 96, 2016. p. 251-259. Doi: 10.1016/j.enpol.2016.04.030. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301421516301999>. Acesso em: 13 jan. 2016.

WANG, Z.; HAN, Z. N.; LIU, M.; JIN, H. Proposal and assessment of a new CCHP system integrating gas turbine and heat-driven cooling/power cogeneration. **Energy Conversion and Management**. v. 144, 2017. p. 1-9. Doi: 10.1016/j.enconman.2017.04.043. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890417303473>. Acesso em: 14 fev. 2018.

WEI-HAN, C.; HUAI-EN, M.; TUN-PING, T. Performance improvement of a split air conditioner by using an energy saving device. **Energy and Buildings**. v. 174, 2018. p. 380-387. Doi: 10.1016/j.enbuild.2018.06.055. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778818308739>. Acesso em: 13 fev. 2019.

WU, J.Y.; WANG J.L.; LI, S.; WANG, R.Z. Experimental and simulative investigation of a micro-CCHP (micro combined cooling, heating and power) system with thermal management controller. **Energy**. v. 68, 2014. p. 444-453. Doi: 10.1016/j.energy.2014.02.057. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544214001911>. Acesso em: 15 ago. 2015.

XIA, J.; WANG, J.; LOU, J.; ZHAO, P.; DAI, Y. Thermo-economic analysis and optimization of a combined cooling and power (CCP) system for engine waste heat recovery. **Energy Conversion and Management**. v. 128, 2016. p. 303-316. Doi: 10.1016/j.enconman.2016.09.086. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890416308949>. Acesso em: 13 jan. 2016.

YANG L.; WAN K. K. W.; LI D. H. W.; LAM, J. C. A new method to develop typical weather years in different climates for building energy use studies. **Energy**. v. 36, 2011. p. 6121-6129. Doi: 0.1016/j.energy.2011.07.053. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544211005275>. Acesso em: 15 ago. 2015.

YAU, Y.H.; PEAN, H.L. The performance study of a split type air conditioning system in the tropics, as affected by weather. **Energy and Buildings**. v. 72, 2014. p. 1-7. Doi: 10.1016/j.enbuild.2013.12.010. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778813008256>. Acesso em: 15 ago. 2015.

YIHTNG, C. N.; KWONG, M. T.; LOON; C. T. A lifecycle-based sustainability indicator framework for waste-to-energy systems and a proposed metric of sustainability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. v. 56, 2016. p. 797-809. Doi: 10.1016/j.rser.2015.11.036. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115013015>. Acesso em: 18 mar. 2019.

YIN, J.; YU, Z.; ZHANG, C.; TIAN, M.; HAN, J. Thermodynamic analysis and multi-objective optimization of a novel power/cooling cogeneration system for low-grade heat sources. **Energy Conversion and Management**. v. 166, 2018. p. 64-73. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.04.028. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418303637>. Acesso em: 18 mar. 2019.

YIN, J.; YU, Z.; ZHANG, C.; TIAN, M.; HAN, J. Thermodynamic analysis on a modified Kalina cycle with parallel cogeneration of power and refrigeration. **Energy Conversion and Management**. v. 163, 2018. p. 1-12. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.02.035. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418301456>. Acesso em: 19 fev. 2019.

ZAREH, A.D.; SARAY, R.K.; MIRMASOUMI, S.; BAHLOULI, K. Extensive thermodynamic and economic analysis of the cogeneration of heat and power system fueled by the blend of natural gas and biogas. **Energy Conversion and Management**. v. 164, 2018. p. 329-343. Doi: 10.1016/j.enconman.2018.03.003. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890418302188>. Acesso em: 10 abr. 2019 .

ZHANG, B.; LONG, W. B. An optimal sizing method for cogeneration plants. **Energy and Buildings**. v. 38, 2006. p. 189-195. Doi: 10.1016/j.enbuild.2005.05.009. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778805000897>. Acesso em: 15 ago. 2015.

APÊNDICE A – Eficiência do *chiller* de absorção

Carga	Temperatura Água gelada	Temperatura de Água Fria	Temperatura da Água quente	TON de Frio	COPtc
0	5	24.0	75.0	10.65	0.70
0	5	24.0	80.0	11.50	0.67
0	5	24.0	85.0	11.80	0.61
0	5	24.0	87.8	12.40	0.60
0	5	24.0	95.0	13.10	0.53
0	5	29.5	75.0	5.70	0.66
0	5	29.5	80.0	7.00	0.64
0	5	29.5	85.0	7.50	0.62
0	5	29.5	87.8	9.45	0.62
0	5	29.5	95.0	11.00	0.57
0	5	31.0	75.0	4.20	0.65
0	5	31.0	80.0	6.60	0.60
0	5	31.0	85.0	7.40	0.63
0	5	31.0	87.8	8.40	0.59
0	5	31.0	95.0	8.50	0.51
0	5	32.0	75.0	2.60	0.50
0	5	32.0	80.0	5.00	0.57
0	5	32.0	85.0	5.80	0.54
0	5	32.0	87.8	7.00	0.52
0	5	32.0	95.0	8.50	0.50
0	6	24.0	75.0	10.80	0.74
0	6	24.0	80.0	12.20	0.72
0	6	24.0	85.0	12.90	0.67
0	6	24.0	87.8	13.60	0.64
0	6	24.0	95.0	14.50	0.59
0	6	29.5	75.0	5.70	0.70
0	6	29.5	80.0	7.60	0.69
0	6	29.5	85.0	8.80	0.66
0	6	29.5	87.8	10.30	0.66
0	6	29.5	95.0	12.40	0.63
0	6	31.0	75.0	4.30	0.69
0	6	31.0	80.0	6.90	0.67
0	6	31.0	85.0	8.00	0.69
0	6	31.0	87.8	9.30	0.65
0	6	31.0	95.0	10.00	0.57
0	6	32.0	75.0	2.70	0.56
0	6	32.0	80.0	5.40	0.63
0	6	32.0	85.0	7.00	0.61
0	6	32.0	87.8	8.00	0.60

0	6	32.0	95.0	9.70	0.56
0	7	24.0	75.0	11.20	0.78
0	7	24.0	80.0	12.80	0.76
0	7	24.0	85.0	14.00	0.73
0	7	24.0	87.8	14.60	0.69
0	7	24.0	95.0	16.10	0.64
0	7	29.5	75.0	5.80	0.74
0	7	29.5	80.0	8.00	0.74
0	7	29.5	85.0	10.00	0.71
0	7	29.5	87.8	11.30	0.71
0	7	29.5	95.0	13.40	0.68
0	7	31.0	75.0	4.50	0.75
0	7	31.0	80.0	7.10	0.73
0	7	31.0	85.0	8.60	0.73
0	7	31.0	87.8	9.80	0.72
0	7	31.0	95.0	11.10	0.64
0	7	32.0	75.0	2.70	0.63
0	7	32.0	80.0	5.70	0.70
0	7	32.0	85.0	8.00	0.70
0	7	32.0	87.8	9.00	0.69
0	7	32.0	95.0	10.80	0.63
0	8	24.0	75.0	11.20	0.78
0	8	24.0	80.0	12.70	0.76
0	8	24.0	85.0	14.40	0.73
0	8	24.0	87.8	15.70	0.70
0	8	24.0	95.0	16.80	0.67
0	8	29.5	75.0	5.80	0.75
0	8	29.5	80.0	8.00	0.74
0	8	29.5	85.0	10.30	0.72
0	8	29.5	87.8	12.30	0.71
0	8	29.5	95.0	14.00	0.70
0	8	31.0	75.0	4.50	0.74
0	8	31.0	80.0	7.70	0.73
0	8	31.0	85.0	9.40	0.73
0	8	31.0	87.8	10.00	0.72
0	8	31.0	95.0	12.00	0.68
0	8	32.0	75.0	2.80	0.62
0	8	32.0	80.0	5.70	0.70
0	8	32.0	85.0	8.30	0.72
0	8	32.0	87.8	9.45	0.71
0	8	32.0	95.0	11.50	0.68
0	9	24.0	75.0	11.20	0.78
0	9	24.0	80.0	12.70	0.76
0	9	24.0	85.0	14.40	0.73
0	9	24.0	87.8	15.80	0.70

0	9	24.0	95.0	17.00	0.68
0	9	29.5	75.0	5.80	0.75
0	9	29.5	80.0	8.00	0.73
0	9	29.5	85.0	10.50	0.73
0	9	29.5	87.8	12.50	0.72
0	9	29.5	95.0	14.50	0.70
0	9	31.0	75.0	4.50	0.74
0	9	31.0	80.0	7.70	0.73
0	9	31.0	85.0	9.35	0.73
0	9	31.0	87.8	10.20	0.72
0	9	31.0	95.0	12.30	0.70
0	9	32.0	75.0	2.80	0.63
0	9	32.0	80.0	5.70	0.70
0	9	32.0	85.0	8.30	0.73
0	9	32.0	87.8	9.80	0.72
0	9	32.0	95.0	11.80	0.68
0	10	24.0	75.0	11.20	0.78
0	10	24.0	80.0	12.70	0.76
0	10	24.0	85.0	14.40	0.74
0	10	24.0	87.8	15.80	0.71
0	10	24.0	95.0	17.30	0.69
0	10	29.5	75.0	5.80	0.75
0	10	29.5	80.0	8.00	0.73
0	10	29.5	85.0	10.60	0.73
0	10	29.5	87.8	12.60	0.72
0	10	29.5	95.0	14.70	0.71
0	10	31.0	75.0	4.50	0.74
0	10	31.0	80.0	7.70	0.73
0	10	31.0	85.0	9.20	0.73
0	10	31.0	87.8	10.30	0.72
0	10	31.0	95.0	12.60	0.70
0	10	32.0	75.0	2.80	0.63
0	10	32.0	80.0	5.70	0.70
0	10	32.0	85.0	8.30	0.73
0	10	32.0	87.8	10.00	0.72
0	10	32.0	95.0	12.10	0.68
0	11	24.0	75.0	11.20	0.78
0	11	24.0	80.0	12.70	0.76
0	11	24.0	85.0	14.40	0.74
0	11	24.0	87.8	15.80	0.71
0	11	24.0	95.0	17.30	0.69
0	11	29.5	75.0	5.80	0.75
0	11	29.5	80.0	8.00	0.73
0	11	29.5	85.0	10.60	0.73
0	11	29.5	87.8	12.60	0.72

0	11	29.5	95.0	14.70	0.71
0	11	31.0	75.0	4.50	0.74
0	11	31.0	80.0	7.70	0.73
0	11	31.0	85.0	9.20	0.73
0	11	31.0	87.8	10.30	0.72
0	11	31.0	95.0	12.60	0.70
0	11	32.0	75.0	2.80	0.63
0	11	32.0	80.0	5.70	0.70
0	11	32.0	85.0	8.30	0.73
0	11	32.0	87.8	10.00	0.72
0	11	32.0	95.0	12.10	0.68
0	12	24.0	75.0	11.20	0.78
0	12	24.0	80.0	12.70	0.76
0	12	24.0	85.0	14.40	0.74
0	12	24.0	87.8	15.80	0.71
0	12	24.0	95.0	17.30	0.69
0	12	29.5	75.0	5.80	0.75
0	12	29.5	80.0	8.00	0.73
0	12	29.5	85.0	10.60	0.73
0	12	29.5	87.8	12.60	0.72
0	12	29.5	95.0	14.80	0.71
0	12	31.0	75.0	4.50	0.74
0	12	31.0	80.0	7.70	0.73
0	12	31.0	85.0	9.20	0.73
0	12	31.0	87.8	10.30	0.72
0	12	31.0	95.0	12.60	0.70
0	12	32.0	75.0	2.80	0.63
0	12	32.0	80.0	5.70	0.70
0	12	32.0	85.0	8.30	0.73
0	12	32.0	87.8	10.00	0.72
0	12	32.0	95.0	12.10	0.68
0.25	5	24.0	75.0	10.65	0.70
0.25	5	24.0	80.0	11.50	0.67
0.25	5	24.0	85.0	11.80	0.61
0.25	5	24.0	87.8	12.40	0.60
0.25	5	24.0	95.0	13.10	0.53
0.25	5	29.5	75.0	5.70	0.66
0.25	5	29.5	80.0	7.00	0.64
0.25	5	29.5	85.0	7.50	0.62
0.25	5	29.5	87.8	9.45	0.62
0.25	5	29.5	95.0	11.00	0.57
0.25	5	31.0	75.0	4.20	0.65
0.25	5	31.0	80.0	6.60	0.60
0.25	5	31.0	85.0	7.40	0.63
0.25	5	31.0	87.8	8.40	0.59

0.25	5	31.0	95.0	8.50	0.51
0.25	5	32.0	75.0	2.60	0.50
0.25	5	32.0	80.0	5.00	0.57
0.25	5	32.0	85.0	5.80	0.54
0.25	5	32.0	87.8	7.00	0.52
0.25	5	32.0	95.0	8.50	0.50
0.25	6	24.0	75.0	10.80	0.74
0.25	6	24.0	80.0	12.20	0.72
0.25	6	24.0	85.0	12.90	0.67
0.25	6	24.0	87.8	13.60	0.64
0.25	6	24.0	95.0	14.50	0.59
0.25	6	29.5	75.0	5.70	0.70
0.25	6	29.5	80.0	7.60	0.69
0.25	6	29.5	85.0	8.80	0.66
0.25	6	29.5	87.8	10.30	0.66
0.25	6	29.5	95.0	12.40	0.63
0.25	6	31.0	75.0	4.30	0.69
0.25	6	31.0	80.0	6.90	0.67
0.25	6	31.0	85.0	8.00	0.69
0.25	6	31.0	87.8	9.30	0.65
0.25	6	31.0	95.0	10.00	0.57
0.25	6	32.0	75.0	2.70	0.56
0.25	6	32.0	80.0	5.40	0.63
0.25	6	32.0	85.0	7.00	0.61
0.25	6	32.0	87.8	8.00	0.60
0.25	6	32.0	95.0	9.70	0.56
0.25	7	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	7	24.0	80.0	12.80	0.76
0.25	7	24.0	85.0	14.00	0.73
0.25	7	24.0	87.8	14.60	0.69
0.25	7	24.0	95.0	16.10	0.64
0.25	7	29.5	75.0	5.80	0.74
0.25	7	29.5	80.0	8.00	0.74
0.25	7	29.5	85.0	10.00	0.71
0.25	7	29.5	87.8	11.30	0.71
0.25	7	29.5	95.0	13.40	0.68
0.25	7	31.0	75.0	4.50	0.75
0.25	7	31.0	80.0	7.10	0.73
0.25	7	31.0	85.0	8.60	0.73
0.25	7	31.0	87.8	9.80	0.72
0.25	7	31.0	95.0	11.10	0.64
0.25	7	32.0	75.0	2.70	0.63
0.25	7	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	7	32.0	85.0	8.00	0.70
0.25	7	32.0	87.8	9.00	0.69

0.25	7	32.0	95.0	10.80	0.63
0.25	8	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	8	24.0	80.0	12.70	0.76
0.25	8	24.0	85.0	14.40	0.73
0.25	8	24.0	87.8	15.70	0.70
0.25	8	24.0	95.0	16.80	0.67
0.25	8	29.5	75.0	5.80	0.75
0.25	8	29.5	80.0	8.00	0.74
0.25	8	29.5	85.0	10.30	0.72
0.25	8	29.5	87.8	12.30	0.71
0.25	8	29.5	95.0	14.00	0.70
0.25	8	31.0	75.0	4.50	0.74
0.25	8	31.0	80.0	7.70	0.73
0.25	8	31.0	85.0	9.40	0.73
0.25	8	31.0	87.8	10.00	0.72
0.25	8	31.0	95.0	12.00	0.68
0.25	8	32.0	75.0	2.80	0.62
0.25	8	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	8	32.0	85.0	8.30	0.72
0.25	8	32.0	87.8	9.45	0.71
0.25	8	32.0	95.0	11.50	0.68
0.25	9	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	9	24.0	80.0	12.70	0.76
0.25	9	24.0	85.0	14.40	0.73
0.25	9	24.0	87.8	15.80	0.70
0.25	9	24.0	95.0	17.00	0.68
0.25	9	29.5	75.0	5.80	0.75
0.25	9	29.5	80.0	8.00	0.73
0.25	9	29.5	85.0	10.50	0.73
0.25	9	29.5	87.8	12.50	0.72
0.25	9	29.5	95.0	14.50	0.70
0.25	9	31.0	75.0	4.50	0.74
0.25	9	31.0	80.0	7.70	0.73
0.25	9	31.0	85.0	9.35	0.73
0.25	9	31.0	87.8	10.20	0.72
0.25	9	31.0	95.0	12.30	0.70
0.25	9	32.0	75.0	2.80	0.63
0.25	9	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	9	32.0	85.0	8.30	0.73
0.25	9	32.0	87.8	9.80	0.72
0.25	9	32.0	95.0	11.80	0.68
0.25	10	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	10	24.0	80.0	12.70	0.76
0.25	10	24.0	85.0	14.40	0.74
0.25	10	24.0	87.8	15.80	0.71

0.25	10	24.0	95.0	17.30	0.69
0.25	10	29.5	75.0	5.80	0.75
0.25	10	29.5	80.0	8.00	0.73
0.25	10	29.5	85.0	10.60	0.73
0.25	10	29.5	87.8	12.60	0.72
0.25	10	29.5	95.0	14.70	0.71
0.25	10	31.0	75.0	4.50	0.74
0.25	10	31.0	80.0	7.70	0.73
0.25	10	31.0	85.0	9.20	0.73
0.25	10	31.0	87.8	10.30	0.72
0.25	10	31.0	95.0	12.60	0.70
0.25	10	32.0	75.0	2.80	0.63
0.25	10	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	10	32.0	85.0	8.30	0.73
0.25	10	32.0	87.8	10.00	0.72
0.25	10	32.0	95.0	12.10	0.68
0.25	11	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	11	24.0	80.0	12.70	0.76
0.25	11	24.0	85.0	14.40	0.74
0.25	11	24.0	87.8	15.80	0.71
0.25	11	24.0	95.0	17.30	0.69
0.25	11	29.5	75.0	5.80	0.75
0.25	11	29.5	80.0	8.00	0.73
0.25	11	29.5	85.0	10.60	0.73
0.25	11	29.5	87.8	12.60	0.72
0.25	11	29.5	95.0	14.70	0.71
0.25	11	31.0	75.0	4.50	0.74
0.25	11	31.0	80.0	7.70	0.73
0.25	11	31.0	85.0	9.20	0.73
0.25	11	31.0	87.8	10.30	0.72
0.25	11	31.0	95.0	12.60	0.70
0.25	11	32.0	75.0	2.80	0.63
0.25	11	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	11	32.0	85.0	8.30	0.73
0.25	11	32.0	87.8	10.00	0.72
0.25	11	32.0	95.0	12.10	0.68
0.25	12	24.0	75.0	11.20	0.78
0.25	12	24.0	80.0	12.70	0.76
0.25	12	24.0	85.0	14.40	0.74
0.25	12	24.0	87.8	15.80	0.71
0.25	12	24.0	95.0	17.30	0.69
0.25	12	29.5	75.0	5.80	0.75
0.25	12	29.5	80.0	8.00	0.73
0.25	12	29.5	85.0	10.60	0.73
0.25	12	29.5	87.8	12.60	0.72

0.25	12	29.5	95.0	14.80	0.71
0.25	12	31.0	75.0	4.50	0.74
0.25	12	31.0	80.0	7.70	0.73
0.25	12	31.0	85.0	9.20	0.73
0.25	12	31.0	87.8	10.30	0.72
0.25	12	31.0	95.0	12.60	0.70
0.25	12	32.0	75.0	2.80	0.63
0.25	12	32.0	80.0	5.70	0.70
0.25	12	32.0	85.0	8.30	0.73
0.25	12	32.0	87.8	10.00	0.72
0.25	12	32.0	95.0	12.10	0.68
0.5	5	24.0	75.0	10.65	0.70
0.5	5	24.0	80.0	11.50	0.67
0.5	5	24.0	85.0	11.80	0.61
0.5	5	24.0	87.8	12.40	0.60
0.5	5	24.0	95.0	13.10	0.53
0.5	5	29.5	75.0	5.70	0.66
0.5	5	29.5	80.0	7.00	0.64
0.5	5	29.5	85.0	7.50	0.62
0.5	5	29.5	87.8	9.45	0.62
0.5	5	29.5	95.0	11.00	0.57
0.5	5	31.0	75.0	4.20	0.65
0.5	5	31.0	80.0	6.60	0.60
0.5	5	31.0	85.0	7.40	0.63
0.5	5	31.0	87.8	8.40	0.59
0.5	5	31.0	95.0	8.50	0.51
0.5	5	32.0	75.0	2.60	0.50
0.5	5	32.0	80.0	5.00	0.57
0.5	5	32.0	85.0	5.80	0.54
0.5	5	32.0	87.8	7.00	0.52
0.5	5	32.0	95.0	8.50	0.50
0.5	6	24.0	75.0	10.80	0.74
0.5	6	24.0	80.0	12.20	0.72
0.5	6	24.0	85.0	12.90	0.67
0.5	6	24.0	87.8	13.60	0.64
0.5	6	24.0	95.0	14.50	0.59
0.5	6	29.5	75.0	5.70	0.70
0.5	6	29.5	80.0	7.60	0.69
0.5	6	29.5	85.0	8.80	0.66
0.5	6	29.5	87.8	10.30	0.66
0.5	6	29.5	95.0	12.40	0.63
0.5	6	31.0	75.0	4.30	0.69
0.5	6	31.0	80.0	6.90	0.67
0.5	6	31.0	85.0	8.00	0.69
0.5	6	31.0	87.8	9.30	0.65

0.5	6	31.0	95.0	10.00	0.57
0.5	6	32.0	75.0	2.70	0.56
0.5	6	32.0	80.0	5.40	0.63
0.5	6	32.0	85.0	7.00	0.61
0.5	6	32.0	87.8	8.00	0.60
0.5	6	32.0	95.0	9.70	0.56
0.5	7	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	7	24.0	80.0	12.80	0.76
0.5	7	24.0	85.0	14.00	0.73
0.5	7	24.0	87.8	14.60	0.69
0.5	7	24.0	95.0	16.10	0.64
0.5	7	29.5	75.0	5.80	0.74
0.5	7	29.5	80.0	8.00	0.74
0.5	7	29.5	85.0	10.00	0.71
0.5	7	29.5	87.8	11.30	0.71
0.5	7	29.5	95.0	13.40	0.68
0.5	7	31.0	75.0	4.50	0.75
0.5	7	31.0	80.0	7.10	0.73
0.5	7	31.0	85.0	8.60	0.73
0.5	7	31.0	87.8	9.80	0.72
0.5	7	31.0	95.0	11.10	0.64
0.5	7	32.0	75.0	2.70	0.63
0.5	7	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	7	32.0	85.0	8.00	0.70
0.5	7	32.0	87.8	9.00	0.69
0.5	7	32.0	95.0	10.80	0.63
0.5	8	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	8	24.0	80.0	12.70	0.76
0.5	8	24.0	85.0	14.40	0.73
0.5	8	24.0	87.8	15.70	0.70
0.5	8	24.0	95.0	16.80	0.67
0.5	8	29.5	75.0	5.80	0.75
0.5	8	29.5	80.0	8.00	0.74
0.5	8	29.5	85.0	10.30	0.72
0.5	8	29.5	87.8	12.30	0.71
0.5	8	29.5	95.0	14.00	0.70
0.5	8	31.0	75.0	4.50	0.74
0.5	8	31.0	80.0	7.70	0.73
0.5	8	31.0	85.0	9.40	0.73
0.5	8	31.0	87.8	10.00	0.72
0.5	8	31.0	95.0	12.00	0.68
0.5	8	32.0	75.0	2.80	0.62
0.5	8	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	8	32.0	85.0	8.30	0.72
0.5	8	32.0	87.8	9.45	0.71

0.5	8	32.0	95.0	11.50	0.68
0.5	9	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	9	24.0	80.0	12.70	0.76
0.5	9	24.0	85.0	14.40	0.73
0.5	9	24.0	87.8	15.80	0.70
0.5	9	24.0	95.0	17.00	0.68
0.5	9	29.5	75.0	5.80	0.75
0.5	9	29.5	80.0	8.00	0.73
0.5	9	29.5	85.0	10.50	0.73
0.5	9	29.5	87.8	12.50	0.72
0.5	9	29.5	95.0	14.50	0.70
0.5	9	31.0	75.0	4.50	0.74
0.5	9	31.0	80.0	7.70	0.73
0.5	9	31.0	85.0	9.35	0.73
0.5	9	31.0	87.8	10.20	0.72
0.5	9	31.0	95.0	12.30	0.70
0.5	9	32.0	75.0	2.80	0.63
0.5	9	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	9	32.0	85.0	8.30	0.73
0.5	9	32.0	87.8	9.80	0.72
0.5	9	32.0	95.0	11.80	0.68
0.5	10	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	10	24.0	80.0	12.70	0.76
0.5	10	24.0	85.0	14.40	0.74
0.5	10	24.0	87.8	15.80	0.71
0.5	10	24.0	95.0	17.30	0.69
0.5	10	29.5	75.0	5.80	0.75
0.5	10	29.5	80.0	8.00	0.73
0.5	10	29.5	85.0	10.60	0.73
0.5	10	29.5	87.8	12.60	0.72
0.5	10	29.5	95.0	14.70	0.71
0.5	10	31.0	75.0	4.50	0.74
0.5	10	31.0	80.0	7.70	0.73
0.5	10	31.0	85.0	9.20	0.73
0.5	10	31.0	87.8	10.30	0.72
0.5	10	31.0	95.0	12.60	0.70
0.5	10	32.0	75.0	2.80	0.63
0.5	10	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	10	32.0	85.0	8.30	0.73
0.5	10	32.0	87.8	10.00	0.72
0.5	10	32.0	95.0	12.10	0.68
0.5	11	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	11	24.0	80.0	12.70	0.76
0.5	11	24.0	85.0	14.40	0.74
0.5	11	24.0	87.8	15.80	0.71

0.5	11	24.0	95.0	17.30	0.69
0.5	11	29.5	75.0	5.80	0.75
0.5	11	29.5	80.0	8.00	0.73
0.5	11	29.5	85.0	10.60	0.73
0.5	11	29.5	87.8	12.60	0.72
0.5	11	29.5	95.0	14.70	0.71
0.5	11	31.0	75.0	4.50	0.74
0.5	11	31.0	80.0	7.70	0.73
0.5	11	31.0	85.0	9.20	0.73
0.5	11	31.0	87.8	10.30	0.72
0.5	11	31.0	95.0	12.60	0.70
0.5	11	32.0	75.0	2.80	0.63
0.5	11	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	11	32.0	85.0	8.30	0.73
0.5	11	32.0	87.8	10.00	0.72
0.5	11	32.0	95.0	12.10	0.68
0.5	12	24.0	75.0	11.20	0.78
0.5	12	24.0	80.0	12.70	0.76
0.5	12	24.0	85.0	14.40	0.74
0.5	12	24.0	87.8	15.80	0.71
0.5	12	24.0	95.0	17.30	0.69
0.5	12	29.5	75.0	5.80	0.75
0.5	12	29.5	80.0	8.00	0.73
0.5	12	29.5	85.0	10.60	0.73
0.5	12	29.5	87.8	12.60	0.72
0.5	12	29.5	95.0	14.80	0.71
0.5	12	31.0	75.0	4.50	0.74
0.5	12	31.0	80.0	7.70	0.73
0.5	12	31.0	85.0	9.20	0.73
0.5	12	31.0	87.8	10.30	0.72
0.5	12	31.0	95.0	12.60	0.70
0.5	12	32.0	75.0	2.80	0.63
0.5	12	32.0	80.0	5.70	0.70
0.5	12	32.0	85.0	8.30	0.73
0.5	12	32.0	87.8	10.00	0.72
0.5	12	32.0	95.0	12.10	0.68
0.75	5	24.0	75.0	10.65	0.70
0.75	5	24.0	80.0	11.50	0.67
0.75	5	24.0	85.0	11.80	0.61
0.75	5	24.0	87.8	12.40	0.60
0.75	5	24.0	95.0	13.10	0.53
0.75	5	29.5	75.0	5.70	0.66
0.75	5	29.5	80.0	7.00	0.64
0.75	5	29.5	85.0	7.50	0.62
0.75	5	29.5	87.8	9.45	0.62

0.75	5	29.5	95.0	11.00	0.57
0.75	5	31.0	75.0	4.20	0.65
0.75	5	31.0	80.0	6.60	0.60
0.75	5	31.0	85.0	7.40	0.63
0.75	5	31.0	87.8	8.40	0.59
0.75	5	31.0	95.0	8.50	0.51
0.75	5	32.0	75.0	2.60	0.50
0.75	5	32.0	80.0	5.00	0.57
0.75	5	32.0	85.0	5.80	0.54
0.75	5	32.0	87.8	7.00	0.52
0.75	5	32.0	95.0	8.50	0.50
0.75	6	24.0	75.0	10.80	0.74
0.75	6	24.0	80.0	12.20	0.72
0.75	6	24.0	85.0	12.90	0.67
0.75	6	24.0	87.8	13.60	0.64
0.75	6	24.0	95.0	14.50	0.59
0.75	6	29.5	75.0	5.70	0.70
0.75	6	29.5	80.0	7.60	0.69
0.75	6	29.5	85.0	8.80	0.66
0.75	6	29.5	87.8	10.30	0.66
0.75	6	29.5	95.0	12.40	0.63
0.75	6	31.0	75.0	4.30	0.69
0.75	6	31.0	80.0	6.90	0.67
0.75	6	31.0	85.0	8.00	0.69
0.75	6	31.0	87.8	9.30	0.65
0.75	6	31.0	95.0	10.00	0.57
0.75	6	32.0	75.0	2.70	0.56
0.75	6	32.0	80.0	5.40	0.63
0.75	6	32.0	85.0	7.00	0.61
0.75	6	32.0	87.8	8.00	0.60
0.75	6	32.0	95.0	9.70	0.56
0.75	7	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	7	24.0	80.0	12.80	0.76
0.75	7	24.0	85.0	14.00	0.73
0.75	7	24.0	87.8	14.60	0.69
0.75	7	24.0	95.0	16.10	0.64
0.75	7	29.5	75.0	5.80	0.74
0.75	7	29.5	80.0	8.00	0.74
0.75	7	29.5	85.0	10.00	0.71
0.75	7	29.5	87.8	11.30	0.71
0.75	7	29.5	95.0	13.40	0.68
0.75	7	31.0	75.0	4.50	0.75
0.75	7	31.0	80.0	7.10	0.73
0.75	7	31.0	85.0	8.60	0.73
0.75	7	31.0	87.8	9.80	0.72

0.75	7	31.0	95.0	11.10	0.64
0.75	7	32.0	75.0	2.70	0.63
0.75	7	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	7	32.0	85.0	8.00	0.70
0.75	7	32.0	87.8	9.00	0.69
0.75	7	32.0	95.0	10.80	0.63
0.75	8	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	8	24.0	80.0	12.70	0.76
0.75	8	24.0	85.0	14.40	0.73
0.75	8	24.0	87.8	15.70	0.70
0.75	8	24.0	95.0	16.80	0.67
0.75	8	29.5	75.0	5.80	0.75
0.75	8	29.5	80.0	8.00	0.74
0.75	8	29.5	85.0	10.30	0.72
0.75	8	29.5	87.8	12.30	0.71
0.75	8	29.5	95.0	14.00	0.70
0.75	8	31.0	75.0	4.50	0.74
0.75	8	31.0	80.0	7.70	0.73
0.75	8	31.0	85.0	9.40	0.73
0.75	8	31.0	87.8	10.00	0.72
0.75	8	31.0	95.0	12.00	0.68
0.75	8	32.0	75.0	2.80	0.62
0.75	8	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	8	32.0	85.0	8.30	0.72
0.75	8	32.0	87.8	9.45	0.71
0.75	8	32.0	95.0	11.50	0.68
0.75	9	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	9	24.0	80.0	12.70	0.76
0.75	9	24.0	85.0	14.40	0.73
0.75	9	24.0	87.8	15.80	0.70
0.75	9	24.0	95.0	17.00	0.68
0.75	9	29.5	75.0	5.80	0.75
0.75	9	29.5	80.0	8.00	0.73
0.75	9	29.5	85.0	10.50	0.73
0.75	9	29.5	87.8	12.50	0.72
0.75	9	29.5	95.0	14.50	0.70
0.75	9	31.0	75.0	4.50	0.74
0.75	9	31.0	80.0	7.70	0.73
0.75	9	31.0	85.0	9.35	0.73
0.75	9	31.0	87.8	10.20	0.72
0.75	9	31.0	95.0	12.30	0.70
0.75	9	32.0	75.0	2.80	0.63
0.75	9	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	9	32.0	85.0	8.30	0.73
0.75	9	32.0	87.8	9.80	0.72

0.75	9	32.0	95.0	11.80	0.68
0.75	10	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	10	24.0	80.0	12.70	0.76
0.75	10	24.0	85.0	14.40	0.74
0.75	10	24.0	87.8	15.80	0.71
0.75	10	24.0	95.0	17.30	0.69
0.75	10	29.5	75.0	5.80	0.75
0.75	10	29.5	80.0	8.00	0.73
0.75	10	29.5	85.0	10.60	0.73
0.75	10	29.5	87.8	12.60	0.72
0.75	10	29.5	95.0	14.70	0.71
0.75	10	31.0	75.0	4.50	0.74
0.75	10	31.0	80.0	7.70	0.73
0.75	10	31.0	85.0	9.20	0.73
0.75	10	31.0	87.8	10.30	0.72
0.75	10	31.0	95.0	12.60	0.70
0.75	10	32.0	75.0	2.80	0.63
0.75	10	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	10	32.0	85.0	8.30	0.73
0.75	10	32.0	87.8	10.00	0.72
0.75	10	32.0	95.0	12.10	0.68
0.75	11	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	11	24.0	80.0	12.70	0.76
0.75	11	24.0	85.0	14.40	0.74
0.75	11	24.0	87.8	15.80	0.71
0.75	11	24.0	95.0	17.30	0.69
0.75	11	29.5	75.0	5.80	0.75
0.75	11	29.5	80.0	8.00	0.73
0.75	11	29.5	85.0	10.60	0.73
0.75	11	29.5	87.8	12.60	0.72
0.75	11	29.5	95.0	14.70	0.71
0.75	11	31.0	75.0	4.50	0.74
0.75	11	31.0	80.0	7.70	0.73
0.75	11	31.0	85.0	9.20	0.73
0.75	11	31.0	87.8	10.30	0.72
0.75	11	31.0	95.0	12.60	0.70
0.75	11	32.0	75.0	2.80	0.63
0.75	11	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	11	32.0	85.0	8.30	0.73
0.75	11	32.0	87.8	10.00	0.72
0.75	11	32.0	95.0	12.10	0.68
0.75	12	24.0	75.0	11.20	0.78
0.75	12	24.0	80.0	12.70	0.76
0.75	12	24.0	85.0	14.40	0.74
0.75	12	24.0	87.8	15.80	0.71

0.75	12	24.0	95.0	17.30	0.69
0.75	12	29.5	75.0	5.80	0.75
0.75	12	29.5	80.0	8.00	0.73
0.75	12	29.5	85.0	10.60	0.73
0.75	12	29.5	87.8	12.60	0.72
0.75	12	29.5	95.0	14.80	0.71
0.75	12	31.0	75.0	4.50	0.74
0.75	12	31.0	80.0	7.70	0.73
0.75	12	31.0	85.0	9.20	0.73
0.75	12	31.0	87.8	10.30	0.72
0.75	12	31.0	95.0	12.60	0.70
0.75	12	32.0	75.0	2.80	0.63
0.75	12	32.0	80.0	5.70	0.70
0.75	12	32.0	85.0	8.30	0.73
0.75	12	32.0	87.8	10.00	0.72
0.75	12	32.0	95.0	12.10	0.68
0	5	24.0	75.0	10.65	0.70
1	5	24.0	80.0	11.50	0.67
1	5	24.0	85.0	11.80	0.61
1	5	24.0	87.8	12.40	0.60
1	5	24.0	95.0	13.10	0.53
1	5	29.5	75.0	5.70	0.66
1	5	29.5	80.0	7.00	0.64
1	5	29.5	85.0	7.50	0.62
1	5	29.5	87.8	9.45	0.62
1	5	29.5	95.0	11.00	0.57
1	5	31.0	75.0	4.20	0.65
1	5	31.0	80.0	6.60	0.60
1	5	31.0	85.0	7.40	0.63
1	5	31.0	87.8	8.40	0.59
1	5	31.0	95.0	8.50	0.51
1	5	32.0	75.0	2.60	0.50
1	5	32.0	80.0	5.00	0.57
1	5	32.0	85.0	5.80	0.54
1	5	32.0	87.8	7.00	0.52
1	5	32.0	95.0	8.50	0.50
1	6	24.0	75.0	10.80	0.74
1	6	24.0	80.0	12.20	0.72
1	6	24.0	85.0	12.90	0.67
1	6	24.0	87.8	13.60	0.64
1	6	24.0	95.0	14.50	0.59
1	6	29.5	75.0	5.70	0.70
1	6	29.5	80.0	7.60	0.69
1	6	29.5	85.0	8.80	0.66
1	6	29.5	87.8	10.30	0.66

1	6	29.5	95.0	12.40	0.63
1	6	31.0	75.0	4.30	0.69
1	6	31.0	80.0	6.90	0.67
1	6	31.0	85.0	8.00	0.69
1	6	31.0	87.8	9.30	0.65
1	6	31.0	95.0	10.00	0.57
1	6	32.0	75.0	2.70	0.56
1	6	32.0	80.0	5.40	0.63
1	6	32.0	85.0	7.00	0.61
1	6	32.0	87.8	8.00	0.60
1	6	32.0	95.0	9.70	0.56
1	7	24.0	75.0	11.20	0.78
1	7	24.0	80.0	12.80	0.76
1	7	24.0	85.0	14.00	0.73
1	7	24.0	87.8	14.60	0.69
1	7	24.0	95.0	16.10	0.64
1	7	29.5	75.0	5.80	0.74
1	7	29.5	80.0	8.00	0.74
1	7	29.5	85.0	10.00	0.71
1	7	29.5	87.8	11.30	0.71
1	7	29.5	95.0	13.40	0.68
1	7	31.0	75.0	4.50	0.75
1	7	31.0	80.0	7.10	0.73
1	7	31.0	85.0	8.60	0.73
1	7	31.0	87.8	9.80	0.72
1	7	31.0	95.0	11.10	0.64
1	7	32.0	75.0	2.70	0.63
1	7	32.0	80.0	5.70	0.70
1	7	32.0	85.0	8.00	0.70
1	7	32.0	87.8	9.00	0.69
1	7	32.0	95.0	10.80	0.63
1	8	24.0	75.0	11.20	0.78
1	8	24.0	80.0	12.70	0.76
1	8	24.0	85.0	14.40	0.73
1	8	24.0	87.8	15.70	0.70
1	8	24.0	95.0	16.80	0.67
1	8	29.5	75.0	5.80	0.75
1	8	29.5	80.0	8.00	0.74
1	8	29.5	85.0	10.30	0.72
1	8	29.5	87.8	12.30	0.71
1	8	29.5	95.0	14.00	0.70
1	8	31.0	75.0	4.50	0.74
1	8	31.0	80.0	7.70	0.73
1	8	31.0	85.0	9.40	0.73
1	8	31.0	87.8	10.00	0.72

1	8	31.0	95.0	12.00	0.68
1	8	32.0	75.0	2.80	0.62
1	8	32.0	80.0	5.70	0.70
1	8	32.0	85.0	8.30	0.72
1	8	32.0	87.8	9.45	0.71
1	8	32.0	95.0	11.50	0.68
1	9	24.0	75.0	11.20	0.78
1	9	24.0	80.0	12.70	0.76
1	9	24.0	85.0	14.40	0.73
1	9	24.0	87.8	15.80	0.70
1	9	24.0	95.0	17.00	0.68
1	9	29.5	75.0	5.80	0.75
1	9	29.5	80.0	8.00	0.73
1	9	29.5	85.0	10.50	0.73
1	9	29.5	87.8	12.50	0.72
1	9	29.5	95.0	14.50	0.70
1	9	31.0	75.0	4.50	0.74
1	9	31.0	80.0	7.70	0.73
1	9	31.0	85.0	9.35	0.73
1	9	31.0	87.8	10.20	0.72
1	9	31.0	95.0	12.30	0.70
1	9	32.0	75.0	2.80	0.63
1	9	32.0	80.0	5.70	0.70
1	9	32.0	85.0	8.30	0.73
1	9	32.0	87.8	9.80	0.72
1	9	32.0	95.0	11.80	0.68
1	10	24.0	75.0	11.20	0.78
1	10	24.0	80.0	12.70	0.76
1	10	24.0	85.0	14.40	0.74
1	10	24.0	87.8	15.80	0.71
1	10	24.0	95.0	17.30	0.69
1	10	29.5	75.0	5.80	0.75
1	10	29.5	80.0	8.00	0.73
1	10	29.5	85.0	10.60	0.73
1	10	29.5	87.8	12.60	0.72
1	10	29.5	95.0	14.70	0.71
1	10	31.0	75.0	4.50	0.74
1	10	31.0	80.0	7.70	0.73
1	10	31.0	85.0	9.20	0.73
1	10	31.0	87.8	10.30	0.72
1	10	31.0	95.0	12.60	0.70
1	10	32.0	75.0	2.80	0.63
1	10	32.0	80.0	5.70	0.70
1	10	32.0	85.0	8.30	0.73
1	10	32.0	87.8	10.00	0.72

1	10	32.0	95.0	12.10	0.68
1	11	24.0	75.0	11.20	0.78
1	11	24.0	80.0	12.70	0.76
1	11	24.0	85.0	14.40	0.74
1	11	24.0	87.8	15.80	0.71
1	11	24.0	95.0	17.30	0.69
1	11	29.5	75.0	5.80	0.75
1	11	29.5	80.0	8.00	0.73
1	11	29.5	85.0	10.60	0.73
1	11	29.5	87.8	12.60	0.72
1	11	29.5	95.0	14.70	0.71
1	11	31.0	75.0	4.50	0.74
1	11	31.0	80.0	7.70	0.73
1	11	31.0	85.0	9.20	0.73
1	11	31.0	87.8	10.30	0.72
1	11	31.0	95.0	12.60	0.70
1	11	32.0	75.0	2.80	0.63
1	11	32.0	80.0	5.70	0.70
1	11	32.0	85.0	8.30	0.73
1	11	32.0	87.8	10.00	0.72
1	11	32.0	95.0	12.10	0.68
1	12	24.0	75.0	11.20	0.78
1	12	24.0	80.0	12.70	0.76
1	12	24.0	85.0	14.40	0.74
1	12	24.0	87.8	15.80	0.71
1	12	24.0	95.0	17.30	0.69
1	12	29.5	75.0	5.80	0.75
1	12	29.5	80.0	8.00	0.73
1	12	29.5	85.0	10.60	0.73
1	12	29.5	87.8	12.60	0.72
1	12	29.5	95.0	14.80	0.71
1	12	31.0	75.0	4.50	0.74
1	12	31.0	80.0	7.70	0.73
1	12	31.0	85.0	9.20	0.73
1	12	31.0	87.8	10.30	0.72
1	12	31.0	95.0	12.60	0.70
1	12	32.0	75.0	2.80	0.63
1	12	32.0	80.0	5.70	0.70
1	12	32.0	85.0	8.30	0.73
1	12	32.0	87.8	10.00	0.72
1	12	32.0	95.0	12.10	0.68

Fonte: O AUTOR (2015).