



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LEOMI DE SOUZA SILVA

**ANÁLISE DE CICLOS REGENERATIVOS EM CENTRAIS TÉRMICAS
SOLARES CONSIDERANDO A MÁXIMA EFICIÊNCIA DO CICLO**

RECIFE – PE

2016

LEOMI DE SOUZA SILVA

**ANÁLISE DE CICLOS REGENERATIVOS EM CENTRAIS
TÉRMICAS SOLARES CONSIDERANDO A MÁXIMA EFICIÊNCIA
DO CICLO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco como requisito básico para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador:

Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha

RECIFE - PE

2016

Catálogo na fonte

Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

S586a Silva, Leomi de Souza.

Análise de ciclos regenerativos em centrais térmicas solares considerando a máxima eficiência do ciclo / Leomi de Souza Silva - 2016.

37folhas, Il.; Tab.; e Sigl.

Orientador: Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Curso de Engenharia Mecânica, 2016.

Inclui Referências.

1. Engenharia Mecânica. 2. Ciclo Rankine Regenerativo. 3. Coletores Solares. 4. Eficiência Máxim. 5. Trabalho da Turbina. 6. EES. I. Cunha, André Felipe Vieira da. (Orientador). II. Título.

LEOMI DE SOUZA SILVA

**ANÁLISE DE CICLOS REGENERATIVOS EM CENTRAIS TÉRMICAS
SOLARES CONSIDERANDO A MÁXIMA EFICIÊNCIA DO CICLO**

Trabalho de Conclusão de Curso aprovado como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco.

Banca Examinadora

Prof. Dr. André Felipe Vieira da Cunha (Orientador)

Prof. Dr. Jose Claudino de Lira Junior

Prof^a. Dr^a. Ana Rosa Mendes Primo

Recife, ____/____/____

DEDICO

Aos meus pais, Luiz e Zilmar, que sempre se orgulharam e torceram por mim nessa conquista. Aos meus amigos, colegas e professores da UFPE que acompanharam e contribuíram na minha trajetória durante o curso.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, primeiramente, por toda força e persistência dada a mim para entrar na faculdade, além de garra, vontade e dedicação nos estudos durante a graduação. Aos meus pais, por todo apoio moral e financeiro. A UFPE, em especial pelas bolsas de incentivo acadêmico e permanência concedidas a mim. A meu orientador, André Felipe Vieira da Cunha, que muito me apoiou e auxiliou através de seu profundo conhecimento. E por fim, aos meus colegas da faculdade e amigos que de alguma forma contribuíram para a realização desse sonho.

“Abrir a boca para proferir palavras de ódio é altamente irreversível, uma vez que isso gera entropia (desordem) e pode causar danos consideráveis. ”

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.
Cap. 7, p. 349.

RESUMO

Nesse trabalho, foi realizada uma análise da eficiência máxima do ciclo Rankine Regenerativo com até 5 extrações, objetivando a sua utilização na área de energia solar. Desta forma, incorporou-se coletores solares como fonte de calor para o sistema. Foi obtido o comportamento da eficiência do ciclo em função das temperaturas de evaporação nos coletores solares que variavam de 200 °C a 360 °C, do número de extrações na turbina (até 5 extrações) e temperatura de superaquecimento (400 °C, 500 °C e 600 °C). Além disso, foi obtido e analisado o comportamento do trabalho total na eficiência máxima em função dos mesmos parâmetros anteriores. Para a obtenção da eficiência máxima do ciclo foi necessário descobrir quais as pressões de extração da turbina, ou seja, qual combinação de valores de pressões de extração forneciam a maior eficiência para cada temperatura de evaporação e superaquecimento. Para isto, utilizou-se o software Engineering Equation Solver (EES) com objetivo de se obter interações matemática com um determinado incremento de pressão. Este trabalho forneceu um melhor entendimento da viabilidade e comportamento do ciclo sob o ponto de vista da eficiência máxima. Foi verificado que o aumento da temperatura de superaquecimento aumenta a eficiência e o trabalho gerado; o aumento da temperatura de evaporação ocasiona o aumento contínuo da eficiência, mas, o trabalho da turbina atinge um valor máximo que não significa ser o valor máximo de eficiência do ciclo; o aumento do número de aquecedores e da temperatura de evaporação melhora a eficiência do ciclo, porém, diminuí o trabalho da turbina e, ainda, o aumento do número de aquecedores, melhora a eficiência do ciclo, mas deixa de ser significativo após 3 extrações, portanto pode ser economicamente inviável.

Palavras-chave: Ciclo Rankine regenerativo. Coletores solares. EES. Eficiência máxima. Trabalho da turbina.

ABSTRACT

In this work, an analysis of the maximum efficiency of the Rankine Regenerative cycle with up to 5 extractions was carried out, aiming at its use in the solar energy area. In this way, solar collectors were incorporated as heat source for the system. The efficiency of the cycle was determined as a function of the evaporation temperatures in the solar collectors ranging from 200 ° C to 360 ° C, the number of extractions in the turbine (up to 5 extractions) and the superheat temperature (400 ° C, 500 ° C C and 600 ° C). In addition, the performance of the total work at maximum efficiency was obtained and analyzed in function of the same previous parameters. In order to obtain the maximum efficiency of the cycle, it was necessary to determine the extraction pressures of the turbine, ie, which combination of extraction pressures values provided the highest efficiency for each evaporation temperature and overheating. For this, the Engineering Equation Solver (EES) software was used in order to obtain mathematical interactions with a certain increase of pressure. This work provided a better understanding of the feasibility and behavior of the cycle from the point of view of maximum efficiency. It has been found that increasing the superheat temperature increases the efficiency and the work generated; The increase of the evaporation temperature causes the continuous increase of the efficiency, but, the work of the turbine reaches a maximum value that does not mean to be the maximum value of efficiency of the cycle; The increase in the number of heaters and the evaporation temperature improves the efficiency of the cycle, however, the turbine work and the increase in the number of heaters improves the efficiency of the cycle, but it is no longer significant after 3 extractions, Therefore it can be economically unfeasible.

Keywords: Rankine regenerativo cycle. Solar collectors. EES. Maximum efficiency. Work of the turbine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ciclo Rankine regenerativo com uma extração	13
Figura 2 - Ciclo Rankine simples ideal	17
Figura 3 - Ciclo Rankine regenerativo ideal com uma extração	19
Figura 4 - Ciclo Rankine regenerativo com 2 extrações	20
Figura 5 - Ciclo Rankine regenerativo com n extrações	20
Figura 6 - Eficiência máxima em função da temperatura de evaporação, T_{ev} , e da temperatura de superaquecimento, T_{sup} (°C) do Ciclo: (a) Rankine; (b) com 01 extração; (c) com 02 extrações; (d) com 03 extrações; (e) com 04 extrações; (f) com 05 extrações.....	26
Figura 7 - Comparação da eficiência máxima entres os diversos ciclos, de 0 até 5 extrações para: (a) T_{sup} de 400 °C; (b) T_{sup} de 500 °C; (c) T_{sup} de 600 °C.....	27
Figura 8 - Eficiência máxima em função do número de extrações da turbina para uma temperatura de superaquecimento (T_{sup}) de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C.....	28
Figura 9 - Gráficos da porcentagem da pressão em função da temperatura de evaporação com $T_{sup}= 600$ °C para: (a) 01 extração; (b) 02 extrações; (c) 03 extrações; (d) 04 extrações; (e) 05 extrações.....	29
Figura 10 - Trabalho total (para eficiência máxima) em função de T_{ev} e T_{sup} para o Ciclo: (a) Rankine; (b) com 01 extração; (c) 02 extrações; (d) 03 extrações; (e) 04 extrações; (f) 05 extrações.....	31
Figura 11 - Comparação do trabalho total na eficiência máxima entres os diversos ciclos, de 0 até 5 extrações para T_{sup} de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C.....	32
Figura 12 - Trabalho total (na eficiência máxima) em função do número de extrações da turbina para T_{sup} de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C.....	33
Figura 13 - Fração de Extração (y_1) em função da Temperatura de Evaporação (T_{ev}) para um ciclo Regenerativo com apenas uma extração da turbina.....	34

LISTA DE SIGLAS

T_{ev}	Temperatura de Evaporação
T_{sup}	Temperatura de Superaquecimento
η_{max}	Eficiência Máxima
W_{tmax}	Trabalho Total da Turbina na Eficiência Máxima
EES	Engineering Equation Solver
W_b	Trabalho Realizado pela Bomba
q_e	Calor Fornecido pela Caldeira
q_c	Calor Rejeitado pelo Condensador
η	Eficiência
W_t	Trabalho na Turbina
\dot{W}_t	Potência Gerada na Turbina
\dot{m}_b	Vazão Mássica
\dot{m}_n	Vazão Mássica na Extração n
H_b	Entalpia de Entrada na Turbina
H_c	Entalpia de Entrada no Condensador
H_n	Entalpia na Extração n
h_c	Entalpia na Saída do Condensador
h_{Bc}	Entalpia na Saída da Bomba do Condensador
h_n	Entalpia na Saída do Aquecedor n
h_{Bn}	Entalpia na Saída da Bomba n
y_n	Fração de Vapor Extraída da Turbina no Ponto n
η_c	Eficiência de uma Máquina de Carnot
T_f	Temperatura da Fonte Fria
T_q	Temperatura da Fonte Quente

Sumário

1. INTRODUÇÃO	12
2. JUSTIFICATIVA	14
3. OBJETIVOS	15
3.1. Objetivo Geral	15
3.2. Objetivos Específicos	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	16
4.1. Ciclo Rankine	16
4.2. Análise da energia no Ciclo Rankine	17
4.3. Ciclo Rankine Regenerativo	18
4.4. Análise da energia no ciclo Rankine regenerativo	21
4.5. Revisão Bibliográfica	22
5. METODOLOGIA	24
5.1. Recursos utilizados	24
5.2. Coleta, processamento e análise dos dados	24
6. RESULTADOS E DISCUSÕES	25
6.1. Eficiência máxima em função da temperatura de Evaporação	26
6.2. Eficiência máxima em função do número de extrações da turbina	28
6.3. Porcentagem das pressões de extração da turbina em função da temperatura de evaporação	29
6.4. Trabalho total para eficiência máxima em função da temperatura de evaporação	31
6.5. Trabalho total na eficiência máxima em função do número extrações na turbina	33
7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	35
7.1. Conclusão	35
7.2. Trabalhos futuros	36
REFERÊNCIAS	37

1. INTRODUÇÃO

A eficiência de sistemas energéticos tem por objetivo principal eliminar o desperdício de energia. Essa economia representa a redução de investimentos em novas usinas, com a consequente preservação do meio ambiente e uma significativa redução no preço do produto final para o consumidor.

Segundo GOLDEMBERG (2000), com a crise energética mundial, o termo eficiência energética tem sido amplamente divulgado, seja no meio acadêmico ou industrial. Por definição, a eficiência energética consiste da relação entre o resultado desejado para determinada atividade e o fornecimento necessário (ÇENGEL, 2013).

Por outro lado, a utilização de energias alternativas estão se incorporando cada vez mais na matriz energética mundial, tanto pela sua disponibilidade garantida como pelo seu menor impacto ambiental. A energia irradiada pelo sol se encaixa dentro dessa perspectiva de energias alternativas, sendo considerada uma das principais fontes de energia renovável. Ela é obtida pela luz do Sol. Através de coletores solares essa energia pode ser transformada em energia térmica.

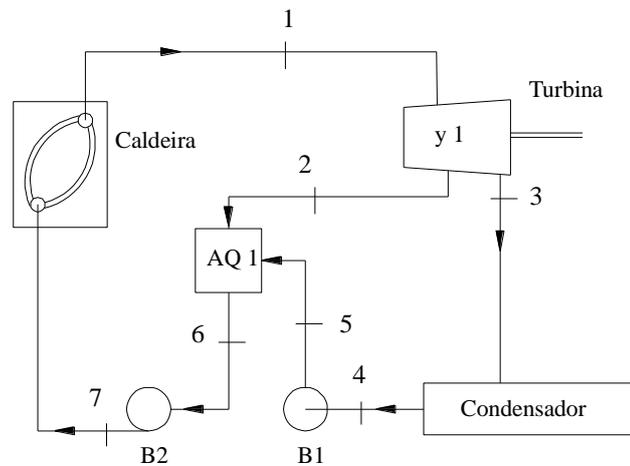
Segundo PALZ (2002), a energia solar recebida pela Terra a cada ano é dez vezes superior a contida em toda a reserva de combustíveis fósseis. Mas, atualmente a maior parte da energia utilizada pela humanidade provém de combustíveis fósseis.

A Energia Solar apresenta inúmeras vantagens, principalmente em países como o Brasil, onde o Sol é soberano na maioria das regiões o ano todo. Ela possui vários benefícios, como sendo uma energia limpa, não polui o meio ambiente, não consome combustível, entre outros.

Nesse presente trabalho, será feita análise numérica da eficiência do ciclo Rankine Regenerativo tendo incorporada as duas perspectivas anteriormente mencionada: eficiência energética (eficiência térmica) do ciclo e a energia solar como fonte de calor para o sistema.

A Figura 1 dá uma certa visão acerca do ciclo mencionado que será discutido com mais detalhes ao longo do trabalho.

Figura 1 - Ciclo Rankine regenerativo com uma extração



Fonte: HAYWOOD, 1949.

A caldeira, ou evaporador, será substituída por coletores solares, que será agora a fonte de energia do ciclo. Assim, será obtido o comportamento da eficiência em função das temperaturas de evaporação (da água nos coletores solares) e do número de extrações na turbina (a Figura 1 mostra o ciclo com uma extração) e temperatura de superaquecimento.

Assim, diante dessa linha de pesquisa e da problemática abordada, surgem as seguintes perguntas: como se comporta a eficiência térmica com o aumento do número de extrações, temperatura de evaporação e de superaquecimento? Quais as pressões de extração garantirão o rendimento máximo do ciclo? Como se comportam essas pressões ao longo do aumento do número de extrações e variação da temperatura de evaporação? Como se comporta o trabalho total quando obtido a eficiência máxima?

2. JUSTIFICATIVA

Hoje o aquecimento global e as mudanças climáticas são motivo de preocupação no mundo, e, sem dúvida, a melhoria da eficiência energética é uma das soluções mais econômica, eficaz e capaz de minimizar impactos ambientais, que são acelerados pelo uso inadequado da energia e do seu mau aproveitamento.

Além disso, a melhoria da eficiência poupa recursos naturais, diminui custos de produção, possibilita a produção de bens cada vez mais baratos e competitivos, aumentando o poder de compra do consumidor, melhora o desempenho econômico da empresa, entre outros benefícios.

Além do mais, sabe-se que uso de energia solar oferece inúmeros benefícios ambientais, especificamente em termos de sua capacidade de renovação e a redução das emissões de gases de efeito estufa e também benefícios econômicos.

Ainda, os trabalhos até aqui encontrados sobre a determinada linha de pesquisa desse trabalho, são mais deducionais e com utilização de hipóteses. Outros, buscam pelo comportamento da eficiência do ciclo tendo como variável apenas o número de aquecedores, além de não se preocupar pela obtenção da eficiência máxima com a variação de outros parâmetros. Diferentemente desses, o presente trabalho irá expor uma análise dos resultados apresentados de forma mais detalhada e com auxílios de software para obtenção da eficiência máxima através da variação de diversos parâmetros, além do uso de planilhas e gráficos, para melhor estudo e análise dos resultados obtidos. Dessa forma, será obtida uma ideia mais aprofundada do tema abordado.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo Geral

Analisar, numericamente, Ciclos Regenerativos em centrais térmicas solares considerando a máxima eficiência do ciclo.

3.2. Objetivos Específicos

- Obter a eficiência máxima do ciclo Regenerativo para diferentes temperaturas de evaporação, números de extrações e temperatura de superaquecimento.
- Estudar e analisar o comportamento da eficiência térmica nos ciclos Regenerativos com a variação da temperatura de evaporação, número de extração e temperatura de superaquecimento.
- Obter e analisar o comportamento das pressões de extração nos diferentes números de extração em função da temperatura de evaporação.
- Verificar o grau de sensibilidade da eficiência máxima térmica do ciclo em relação às pressões de extração e comparar com a temperatura de evaporação.
- Obter e analisar o comportamento do trabalho total em função da temperatura de evaporação, de superaquecimento e do número de extração da turbina, quando obtida a eficiência máxima.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo WYLEN (1997), alguns tipos de centrais de potência, como a central simples a vapor d'água, operam segundo um ciclo. Isto é, o fluido de trabalho sofre uma série de processos e finalmente retorna ao estado inicial. De modo diferente, em outras centrais de potência, tais como o motor de combustão interna e a turbina a gás, o fluido de trabalho não passa por um ciclo termodinâmico, ainda que o equipamento opere segundo um ciclo mecânico. Neste caso, o fluido de trabalho, no fim do processo apresenta uma composição química diferente ou está em estado termodinâmico diferente do inicial.

No presente trabalho será usado o ciclo de potência a vapor. Em tais ciclos, o vapor de água é o fluido de trabalho mais comum utilizado, pois tem várias características desejáveis, como baixo custo, disponibilidade e alta entalpia de vaporização. Nesse ciclo, o fluido de trabalho é alternadamente vaporizado e condensado.

4.1. Ciclo Rankine

Este é um ciclo ideal, constituído por quatro processos que ocorrem em regime permanente sem irreversibilidade interna.

Os quatro processos são os seguintes:

1-2 Compressão isentrópica

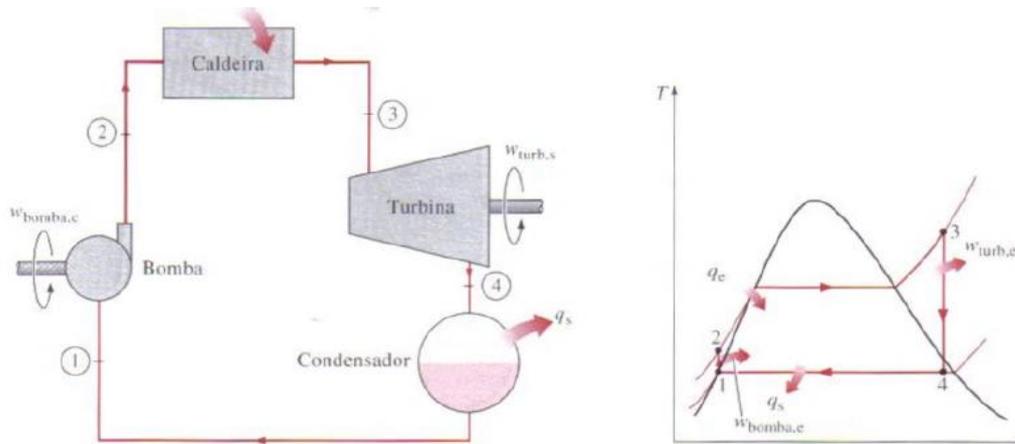
2-3 Fornecimento de Calor a pressão constante em uma caldeira

3-4 Expansão Isentrópica em uma Turbina

4-1 Rejeição de calor em um condensador a pressão constante

Esses processos podem ser esquematizados de acordo com a Figura 2.

Figura 2 - Ciclo Rankine simples ideal



Fonte: Çengel, 2013.

Nesse ciclo, a temperatura aumenta um pouco na compressão, devido a uma ligeira diminuição no volume específico, processo 1-2. A caldeira é basicamente um grande trocador de calor, onde o calor pode ser originado por gases de combustão (neste trabalho a caldeira é substituída por coletores solares; porém, é uma substituição simbólica, pois não é objetivo deste trabalho o estudo do comportamento dos coletores dentro do ciclo, ficando como sugestão para trabalhos futuros), a água entra na caldeira como líquido comprimido e sai como vapor superaquecido, aqui o calor é transferido para a água a pressão constante, processo 2-3. A pressão e a temperatura do vapor caem durante o processo até os valores do estado 4, realizando trabalho na turbina. Nesse estado, o vapor é, em geral, uma mistura de líquido e vapor, com título elevado, ou seja, com grande porcentagem de vapor. Desse estado, o vapor entra no condensador, que também é um trocador de calor, mas agora, rejeitando calor para um meio frio, como um lago, por exemplo. A água deixa o condensador como líquido saturado e entra na bomba completando o ciclo.

4.2. Análise da energia no Ciclo Rankine

Os quatro componentes envolvidos no ciclo Rankine ideal, a bomba, caldeira, turbina e o condensador, são dispositivos com escoamento em regime permanente. A caldeira e o condensador não envolvem nenhum trabalho, e considera-se que a bomba e turbina sejam isentrópicas. As variações da energia cinética e potencial são desprezíveis. Assim, a

equação da energia por unidade de massa aplicada para os diversos componentes, de acordo com o esquema da Figura 2, é:

$$\text{Bomba: } W_b = h_1 + v\Delta P (h_2 - h_1) \text{ (trabalho realizado pela bomba)} \quad (1)$$

$$\text{Caldeira: } q_e = h_3 - h_2 \text{ (calor fornecido pela caldeira)} \quad (2)$$

$$\text{Turbina: } W_t = h_3 - h_4 \text{ (trabalho realizado pela turbina)} \quad (3)$$

$$\text{Condensador: } q_s = h_4 - h_1 \text{ (calor rejeitado pelo condensador)} \quad (4)$$

Onde h_n é a entalpia nos pontos indicado na Figura 2, v é o volume específico do líquido no estado 1 e ΔP a variação de pressão entre o estado 1 e 2.

Assim, a eficiência térmica do ciclo é dada por:

$$\eta = \frac{q_e - q_s}{q_e} \quad (5)$$

4.3. Ciclo Rankine Regenerativo

Do ciclo de Carnot, sabe-se que aumentando as diferenças de temperatura entre as fontes quentes e frias, aumenta-se a eficiência do ciclo. Verifica-se no ciclo Rankine, que o calor é transferido para o fluido de trabalho a uma temperatura relativamente baixa, o que diminui a temperatura média do processo. O ciclo Rankine Regenerativo surge para minimizar esse problema. Nesse ciclo, procura-se aumentar a temperatura média do processo de fornecimento de calor, e o modo como isso é feito é aumentando a temperatura do líquido que sai da bomba antes que ele entre na caldeira.

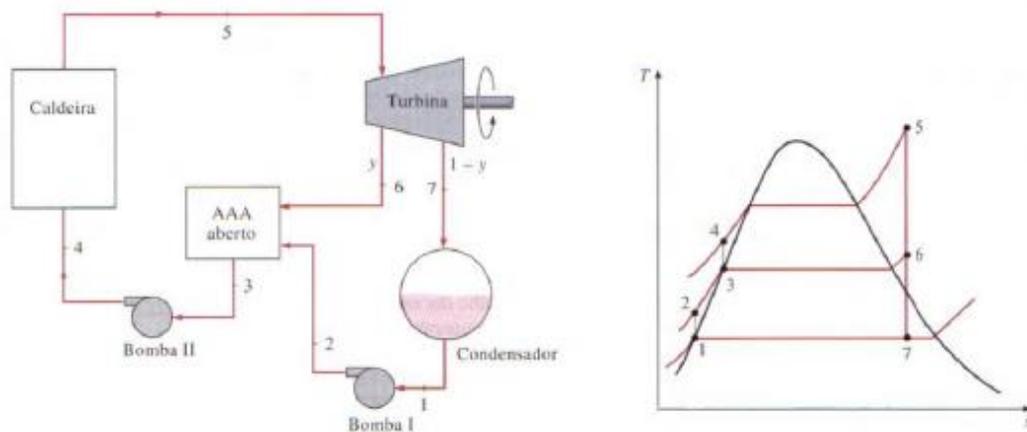
Esse processo é realizado pela extração do vapor da turbina em diversos pontos. Esse vapor, que poderia realizar mais trabalho se completasse toda a expansão na turbina, é extraído antes para aquecer a água que entrará na caldeira, chamada de água de alimentação.

O dispositivo em que a água de alimentação é aquecida por regeneração é chamado, por vez, de aquecedor de água de alimentação (AAA). Esse dispositivo é basicamente um trocador de calor, em que o calor do vapor extraído da turbina aquece a água de alimentação. Neste

trabalho será considerado um aquecedor tipo aberto (de contato direto), onde a troca de calor ocorre por contato direto entre dois fluidos com temperatura diferente.

Esse ciclo é esquematizado na Figura 3.

Figura 3 - Ciclo Rankine regenerativo ideal com uma extração

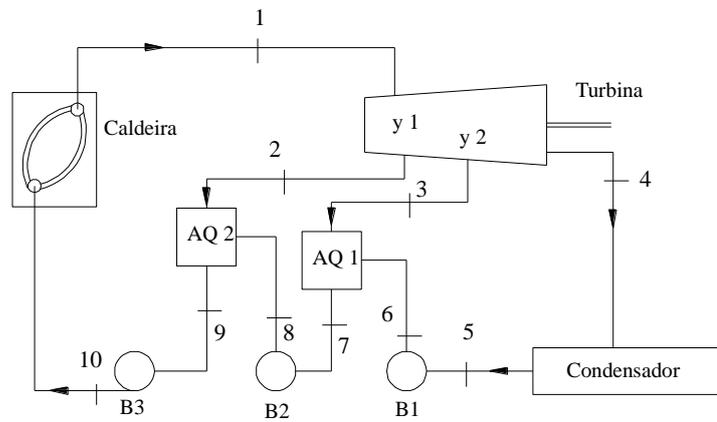


Fonte: Çengel, 2013.

A Figura 3 mostra um ciclo Rankine Regenerativo com apenas uma extração. Onde é possível ver que o vapor extraído da turbina aquece, por mistura, a água que sai da bomba 1, entrando na caldeira com líquido comprimido após passar pela bomba 2, a uma temperatura maior, como é possível inferir do gráfico T-s.

A Figura 4 mostra o esquema de um ciclo Rankine Regenerativo com 2 extrações.

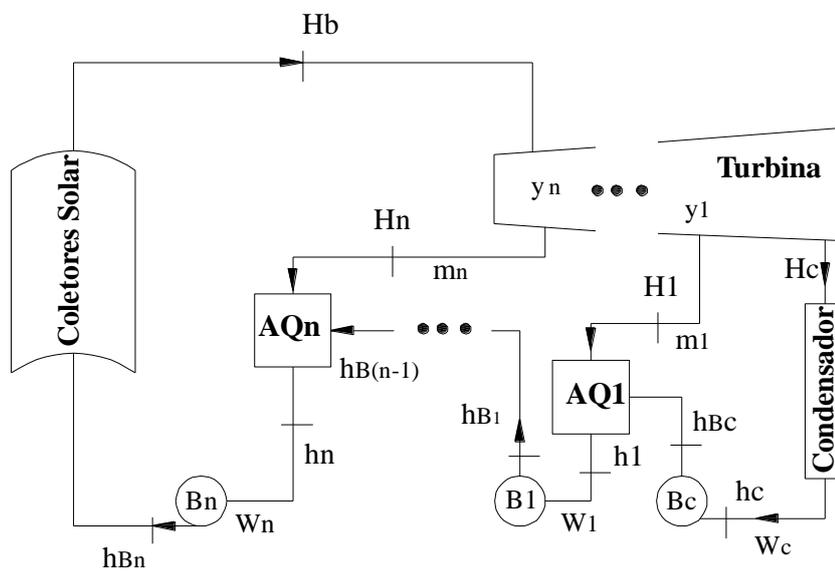
Figura 4 - Ciclo Rankine regenerativo com 2 extrações



Fonte: Haywood, 1949.

A Figura 5 mostra o esquema de um ciclo Rankine Regenerativo com n extrações.

Figura 5 - Ciclo Rankine regenerativo com n extrações



Fonte: Haywood, 1949.

4.4. Análise da energia no ciclo Rankine regenerativo

De acordo com VIEIRA DA CUNHA (2012), as equações gerais para um ciclo Rankine Regenerativo com n extrações depois de feito um balanço de energia, de acordo com a nomenclatura usada na Figura 5, são:

$$w_t = \frac{\dot{W}_t}{\dot{m}_b} = (H_b - H_c) + y_n(H_c - H_n) + \dots + y_1(H_c - H_1) \quad (6)$$

$$y_i = \frac{(h_i - h_{B(i-1)})}{(H_i - h_{B(i-1)})} \left(1 - \sum_{j=i+1}^n y_j \right) \quad (7)$$

$$y_1 = \frac{(h_1 - h_{Bc})}{(H_1 - h_{Bc})} \left(1 - \sum_{j=2}^n y_j \right) \quad (8)$$

$$q_b = H_b - h_{Bn} \quad (9)$$

$$q_c = (h_c - H_c) \left(1 - \sum_{i=1}^n y_i \right) \quad (10)$$

$$\eta_t = \frac{w_t - \sum_{i=1}^n [(1 - \sum_{j=i+1}^n y_j) |w_{Bi}|] - |w_{Bc}| (1 - \sum_{j=1}^n y_j)}{q_b} \quad (11)$$

Onde,

W_t	Trabalho na turbina
\dot{W}_t	Potência gerada na turbina
\dot{m}_b	Vazão mássica
m_n	Vazão mássica na extração n
H_b	Entalpia de entrada na turbina
H_c	Entalpia de entrada no condensador
H_n	Entalpia na extração n
h_c	Entalpia na saída do condensador
h_{Bc}	Entalpia na saída da bomba do condensador
h_n	Entalpia na saída do aquecedor n
h_{Bn}	Entalpia na saída da bomba n
y_n	Fração de vapor extraída da turbina no ponto n
η_t	Eficiência do Ciclo

4.5. Revisão Bibliográfica

Há diversos trabalho e artigos que tratam sobre o Ciclo Rankine Regenerativo, alguns dos que mais se aproxima do presente trabalho serão mencionados a seguir.

HAYWOOD em seu trabalho intitulado como: “A generalized Analesis of the regenerative steam cycle for a finite number of heaters”, (HAYWOOD, 1949), analisou a eficiência do Ciclo Regenerativo até 3 extrações. Porém, em tal trabalho foram feitas diversas considerações para a simplificação dos cálculos, como entalpia constante em trechos do ciclo e trabalho desprezível da bomba nos cálculos, obtendo dessa forma a eficiência do ciclo.

No trabalho de BADR et al. intitulado como: “Rankine Cycles for Steam Power-plants”, (O. Badr et al., 1990), foi obtida e analisada a eficiência térmica do Ciclo Rankine Regenerativo até 8 extrações por meio do desenvolvimento de um programa de computador que permitisse a previsão das propriedades termodinâmicas da água líquida e vapor. A eficiência aqui obtida teve como premissa alguns parâmetros fixos, como temperatura de entrada na turbina e pressão na caldeira. Ela foi obtida em função do aumento da temperatura dos aquecedores de alimentação para os diversos números de extrações. Ainda, nesse trabalho foi feita a comparação da eficiência térmica do Ciclo Rankine Regenerativo com apenas uma extração em função dos tipos de aquecedores (aberto ou fechado).

No trabalho de QUEIROGA DE ANDRADE et al. intitulado como: “Estudo teórico de uma central termoelétrica solar com geração indireta de vapor” foi analisada a eficiência térmica e elétrica dos coletores solares. Nesta pesquisa, as eficiências foram obtidas variando-se uma determinada variável, como comprimento do coletor, largura e outros parâmetros. Nela, foi utilizado um modelo em Mathcad, produzido pelo grupo FAE (Grupo de Fontes Alternativas de Energia do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco) além de um protótipo de uma central termoelétrica no município de Oricuri-PE. Os resultados foram analisados no horário de 12 horas, que é quando o coletor recebe a maior fração da radiação direta, e o dia do ano foi o de 311 que é indicado no programa como sendo o de maior potência elétrica gerada na cidade de Oricuri-PE. As eficiências térmicas dos coletores nessa pesquisa variaram em torno 65%.

Os principais resultados obtidos nela foram:

- Aumentando-se a largura do coletor, a eficiência térmica tende a diminuir, enquanto a elétrica permanece quase inalterada;
- Aumentando-se o comprimento do coletor, a eficiência térmica tende a aumentar, enquanto a elétrica permanece quase inalterada;
- Aumentando-se a razão entre a área de coleta de um coletor e da área do absorvedor valor (chamado de parâmetro C em tal pesquisa), a eficiência térmica tende a aumentar, enquanto a elétrica possui um valor de ponto ótima em C igual a 40;
- Aumentando-se a razão entre razão entre a distância entre as colunas de coletores e a largura do coletor (chamado de parâmetro FLD em tal pesquisa), a eficiência térmica aumenta até atingir um valor estacionário (constante). O mesmo ocorre com a eficiência elétrica.

Esta presente pesquisa é uma continuação dos trabalhos feitos por VIERA DA CUNHA, que fez análise da eficiência máxima (η_{\max}) de um ciclo regenerativo com algumas extrações. O título do seu trabalho é: “Análise do rendimento ótimo de um ciclo regenerativo com uma, duas e três extrações da turbina”. Nesse trabalho, foram levantados resultado, na forma de gráficos, que mostram o rendimento (eficiência) em função da temperatura de evaporação e da temperatura de superaquecimento para os três tipos de extração. Onde se concluiu que o aumento de ambas as temperaturas aumenta o rendimento. Que o aumento do número de aquecedores melhora o rendimento do ciclo.

Vale salientar que este trabalho teve como objetivo obter apenas a eficiência máxima do ciclo e, através dela, analisar outros parâmetros, sem considerar a eficiência dos demais equipamentos envolvidos no ciclo, como bombas, turbina, coletores solares e condensador.

5. METODOLOGIA

5.1. Recursos utilizados

Neste trabalho foi utilizado o software Engineering Equation Solver (EES). Ele é um software geral de resolução de equações que pode resolver numericamente milhares de equações algébricas. Pode ser usado para resolver equações diferenciais e integrais, fazer otimização, converter unidades, gerar gráficos. Uma das grandes características do EES é a base de dados termodinâmicos intrínseco ao programa. Com o uso desse programa foi possível fazer a coleta de dados, por meio de simulação e interações, de uma forma mais precisa e prática.

A interações no EES consistiu em determinar quais as combinações de pressão de extração na turbina forneciam uma eficiência máxima para uma determinada temperatura de evaporação T_{ev} , temperatura de superaquecimento T_{sup} e número de extrações. Ou seja, as interações determinaram em qual momento, na turbina, se devia extrair o vapor para se obter a eficiência máxima, já que a extração tinha como consequência a redução de trabalho na turbina.

Outro software utilizado foi o Microsoft Office Excel 2013. Por meio dele, os dados processados e coletados do EES, foi analisado e estudado através de suas ferramentas, gerando gráficos.

5.2. Coleta, processamento e análise dos dados

Primeiramente foi desenvolvido um programa computacional no EES para cada número de extrações. O programa consistiu em varrer todas as eficiências possíveis extraída ao longo dos diversos pontos da turbina, isso foi possível por meio da pressão na turbina que descesse à medida que o vapor é expandido dentro da mesma. Para o caso de duas ou mais extrações, foram extraídas combinações de extração na turbina que forneciam as eficiências. Com isso, o programa coletava a eficiência máxima (de todas a eficiências encontradas), bem como todos os seus parâmetros de pressão, temperatura de superaquecimento, temperatura de evaporação entre outros dados.

Com os dados coletados pelo EES, utilizou-se do Microsoft Office Excel 2013 gerando diversos gráficos que posteriormente foram analisados para a obtenção de resultados.

O fluido utilizado foi a água com uma pressão no condensador de 10 kPa.

6. RESULTADOS E DISCUSÕES

Primeiramente, será feita uma breve introdução, antes da apresentação dos resultados, do que se esperaria da eficiência do ciclo estudado aqui se ele fosse (se comportasse como) um ciclo de Carnot.

Como se sabe, o ciclo Rankine é um exemplo de máquina térmica e, como tal, a sua eficiência térmica nunca alcançará 100%, ou seja, é impossível converter toda a energia térmica em trabalho. Sabe-se ainda que o ciclo de Carnot é uma idealização de uma máquina térmica com eficiência máxima. É o ciclo teórico que trabalha entre dois limites de temperatura especificada.

Fazendo uma simulação dos dados usados aqui neste trabalho com o ciclo de Carnot, tem-se: a temperatura de superaquecimento T_{sup} (que é a maior temperatura registrada no ciclo) tem-se, portanto, que a maior T_{sup} foi de 600 °C; e a temperatura mínima foi a temperatura de saturação no condensador (10 kPa), com valor de 45,82 °C. Então, em uma máquina térmica de Carnot trabalhando com temperatura da fonte quente 600 °C e a temperatura da fonte fria como 45,82 °C apresentaria uma eficiência de 0,6347. De acordo com a equação 12.

$$\eta_c = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (12)$$

Onde η_c é a eficiência da máquina de Carnot, T_f é a temperatura da fonte fria e T_q é a temperatura da fonte quente.

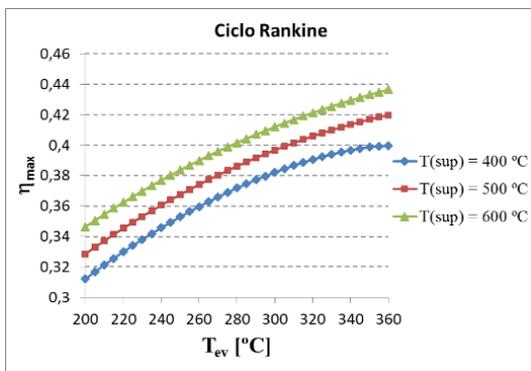
Entretanto, além do ciclo Rankine não ser totalmente reversível, a temperatura de superaquecimento corresponde apenas a um ponto (3) no processo de fornecimento de calor, no processo 2-3 da Figura 2, e não uma isotérmica nesse processo ou tão pouco uma temperatura média no mesmo. Por outro lado, com a Regeneração buscou-se aumentar a temperatura média do processo de fornecimento de calor para melhorar a eficiência do ciclo.

Disso tudo, verifica-se que a eficiência máxima que se pode encontrar nesse trabalho será menor que o valor de 0,6347 do ciclo de Carnot para uma T_{sup} de 600 °C; menor que 0,5876, para uma T_{sup} de 500 °C e, menor que 0,5263 para uma T_{sup} de 400 °C.

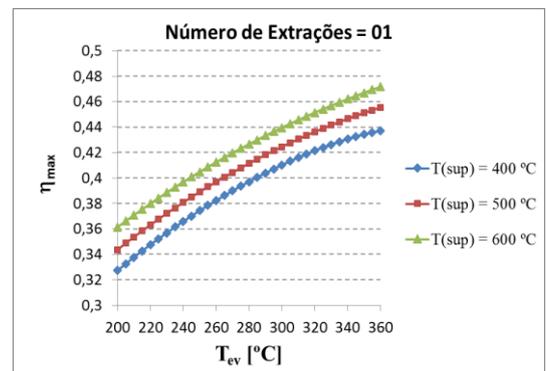
6.1. Eficiência máxima em função da temperatura de Evaporação

O comportamento de η_{\max} do ciclo de Rankine e Regenerativo com extração de 1 a 5 em função da temperatura de evaporação T_{ev} (200 °C a 360 °C) e da temperatura de superaquecimento T_{sup} (400 °C, 500 °C, 600 °C) é mostrada por meio de gráficos na Figura 6.

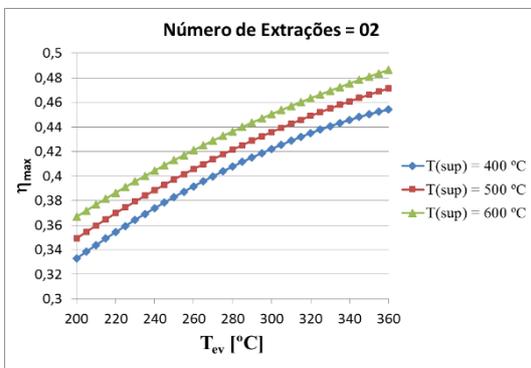
Figura 6 - Eficiência máxima em função da temperatura de evaporação, T_{ev} , e da temperatura de superaquecimento, T_{sup} (°C) do Ciclo: (a) Rankine; (b) com 01 extração; (c) com 02 extrações; (d) com 03 extrações; (e) com 04 extrações; (f) com 05 extrações.



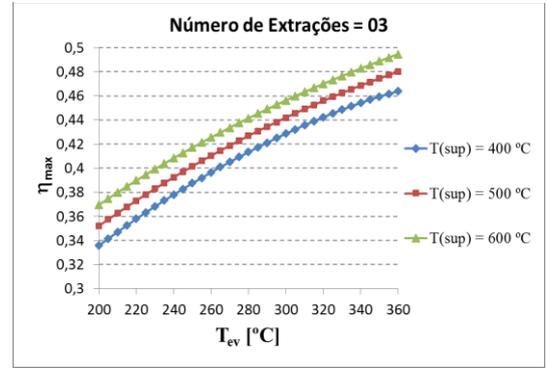
(a)



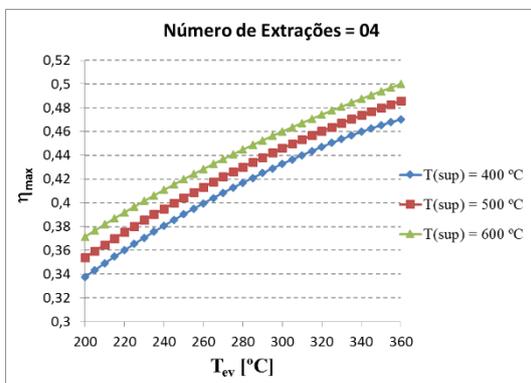
(b)



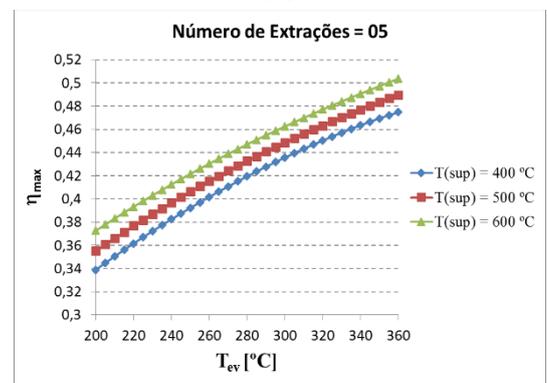
(c)



(d)



(e)



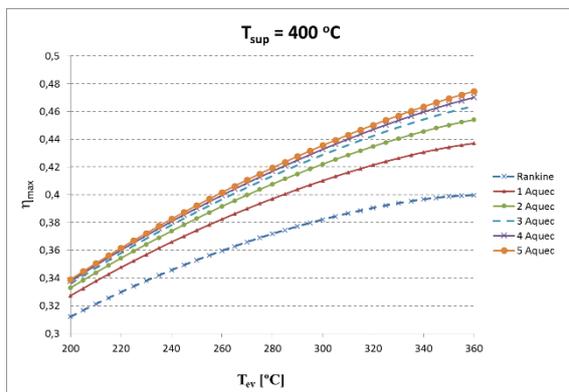
(f)

Os gráficos mostrados nas Figuras de 6, mostraram que a eficiência máxima, η_{\max} , cresce continuamente com o aumento da T_{ev} . Percebeu-se também que o aumento da T_{sup} também aumentou a η_{\max} , cujo gráficos tem aspectos semelhantes entre si, tendo, “visualmente”, um deslocamento no eixo vertical conforme se varia T_{sup} .

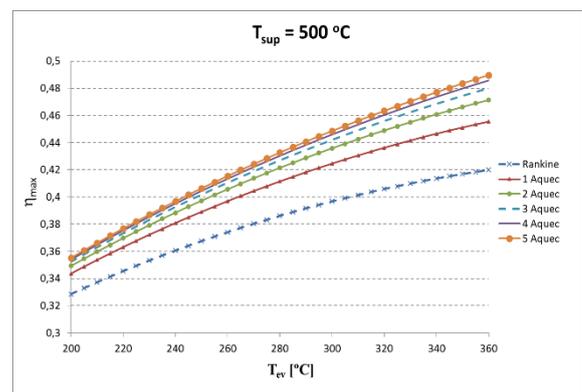
Por outro lado, percebe-se que o crescimento da η_{\max} não é linear. Verifica-se, dos mesmos gráficos, que vai ocorrendo um pequeno decrescimento na variação da η_{\max} com o aumento da T_{ev} .

Os próximos gráficos da Figura 7 mostram a superposição dos gráficos das Figuras 6 para cada T_{sup} considerada aqui, possibilitando uma análise comparativa mais objetiva entre as diversas extrações.

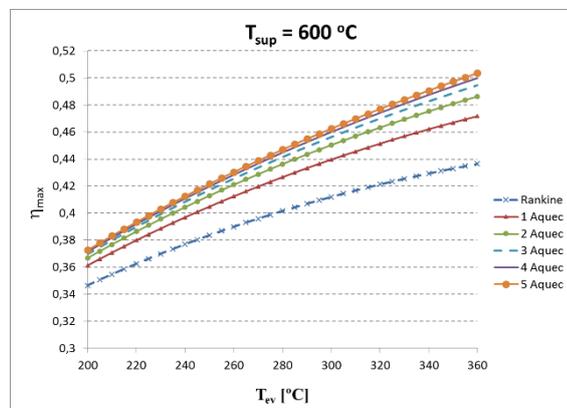
Figura 7 - Comparação da eficiência máxima entres os diversos ciclos, de 0 até 5 extrações para: (a) T_{sup} de 400 °C; (b) T_{sup} de 500 °C; (c) T_{sup} de 600 °C



(a)



(b)



(c)

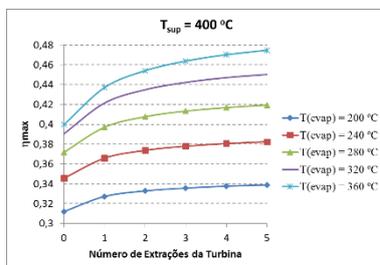
Dos resultados obtidos, é possível concluir que para cada ciclo (de 0 a 5 aquecedores) a eficiência máxima aumenta com o aumento da temperatura de evaporação, como mostrado nas Figuras 6 e 7. Ainda é possível ver claramente que quanto maior o número de aquecedores ou extrações há um aumento na eficiência térmica do ciclo. Porém, essa melhora vai se tornando cada vez menor com o aumento de extrações, ou seja, há um diferencial de melhora maior quando se passa de um ciclo Rankine para um Regenerativo com uma extração do que quando se passa de um ciclo Regenerativo de uma extração para o de duas extrações, e assim por diante. Assim, de acordo com os gráficos das Figuras de 7, pode ser economicamente inviável a construção de uma máquina com mais de 3 aquecedores.

É importante salientar que todo esse aumento da eficiência com o aumento no número de extrações e aumento das temperaturas, T_{ev} e T_{sup} , já era esperado. Porém, não se sabia de forma quantitativa como seria esse aumento. Isso foi fruto deste trabalho, permitindo o conhecimento do quanto se ganharia de eficiência com o aumento destas variáveis, além de muitas outras análises feitas nesse trabalho.

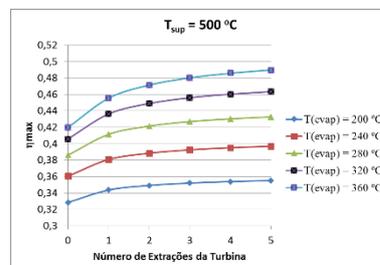
6.2. Eficiência máxima em função do número de extrações da turbina

A Figura 8 mostra o comportamento da eficiência máxima do ciclo Rankine Regenerativo em função do número de extrações para temperatura de evaporação de 200 °C, 240 °C, 280 °C, 320 °C e 360 °C e temperatura de superaquecimento de 400 °C, 500 °C e 600 °C.

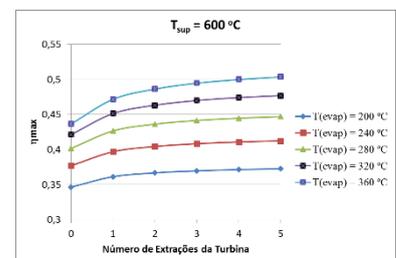
Figura 8 - Eficiência máxima em função do número de extrações da turbina para uma temperatura de superaquecimento (T_{sup}) de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C.



(a)



(b)



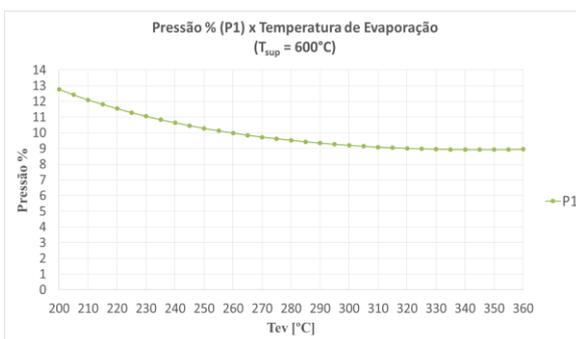
(c)

Da Figura 8, tem-se uma outra visão do aspecto da eficiência, agora variando-a em função do número de extrações da turbina para valores determinados de T_{ev} e T_{sup} . É possível ver que quanto maior o número de extrações, temperatura de evaporação e temperatura de superaquecimento maior é a eficiência máxima. Da Figura citada é possível ainda tirar duas conclusões importantes. Primeiro, o aumento da eficiência máxima cresce cada vez menos com o aumento do número de extrações, independente da temperatura de evaporação e superaquecimento. Segundo, o aumento da eficiência máxima também aumenta cada vez menos com o aumento da temperatura de evaporação, independentemente do número de aquecedores e temperatura de superaquecimento, como já foi verificado anteriormente.

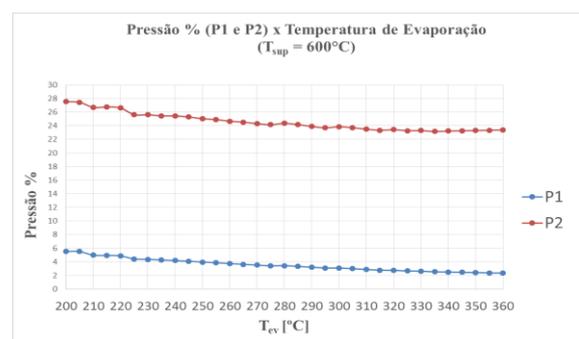
6.3. Porcentagem das pressões de extração da turbina em função da temperatura de evaporação

Aqui será apresentado a fração em forma de porcentagem das pressões de extração da turbina em função da temperatura de evaporação para os diversos números de aquecedores (extrações). Entretanto, somente será apresentada tais frações para a temperatura de superaquecimento de 600 °C, devido a semelhança destes gráficos com os gráficos de temperaturas de superaquecimento para 400 °C e 500 °C. Cada pressão é determinada como a razão entre a pressão que é extraída da turbina no ponto n (1, 2, 3, 4, e/ou 5 - de acordo com a Figura 5) e a pressão na entrada da mesma. Essa fração é calculada em cada temperatura de superaquecimento (de 200 a 360 °C).

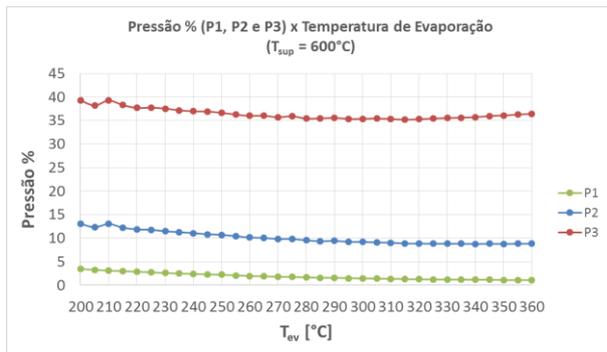
Figura 9 - Gráficos da porcentagem da pressão em função da temperatura de evaporação com $T_{sup}= 600$ °C para: (a) 01 extração; (b) 02 extrações; (c) 03 extrações; (d) 04 extrações; (e) 05 extrações.



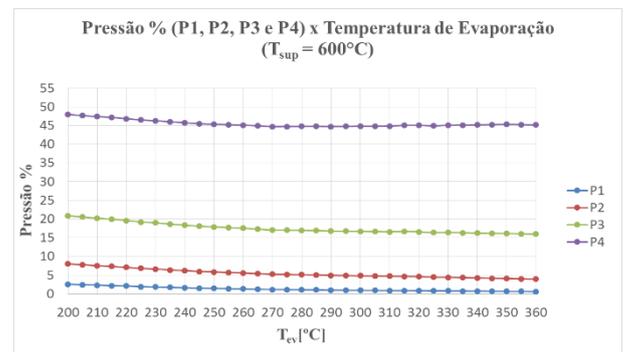
(a)



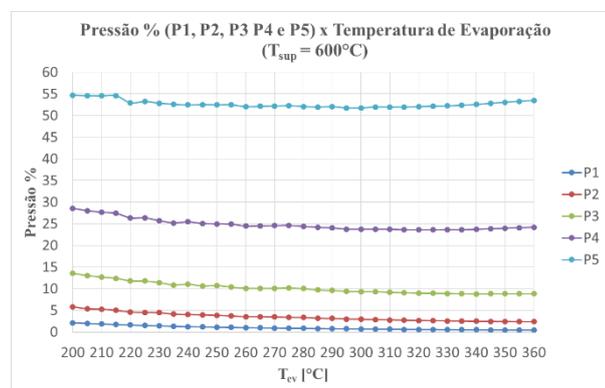
(b)



(c)



(d)



(e)

Sabe-se que a pressão varia com a variação de T_{ev} , ou ainda, a pressão que entra na turbina aumenta com o aumento da temperatura de evaporação. A pressão de extração da turbina é dada como porcentagens em relação a pressão de entrada na turbina. A título de exemplo, para o caso de 5 extrações, Figura 9 (e), com uma pressão de 10.000 kPa as extrações ao longo da turbina serão de ~5.500 kPa (~55%) na primeira extração; de ~2.500 kPa (~25%) na segunda extração; de ~1.000 kPa (~10%) na terceira extração; de ~400 kPa (~4%) na quarta extração e de ~100 kPa (1%) na quinta extração.

Dos gráficos da Figura 9, é possível ver que, em cada ponto de extração, as pressões extraídas da turbina têm uma porcentagem de extração pouco variável com a temperatura de evaporação, podendo decrescer um pouco ao longo do aumento da temperatura de evaporação e, no final, crescer levemente. Verifica-se que essa variação percentual não ultrapassa a casa dos 5%.

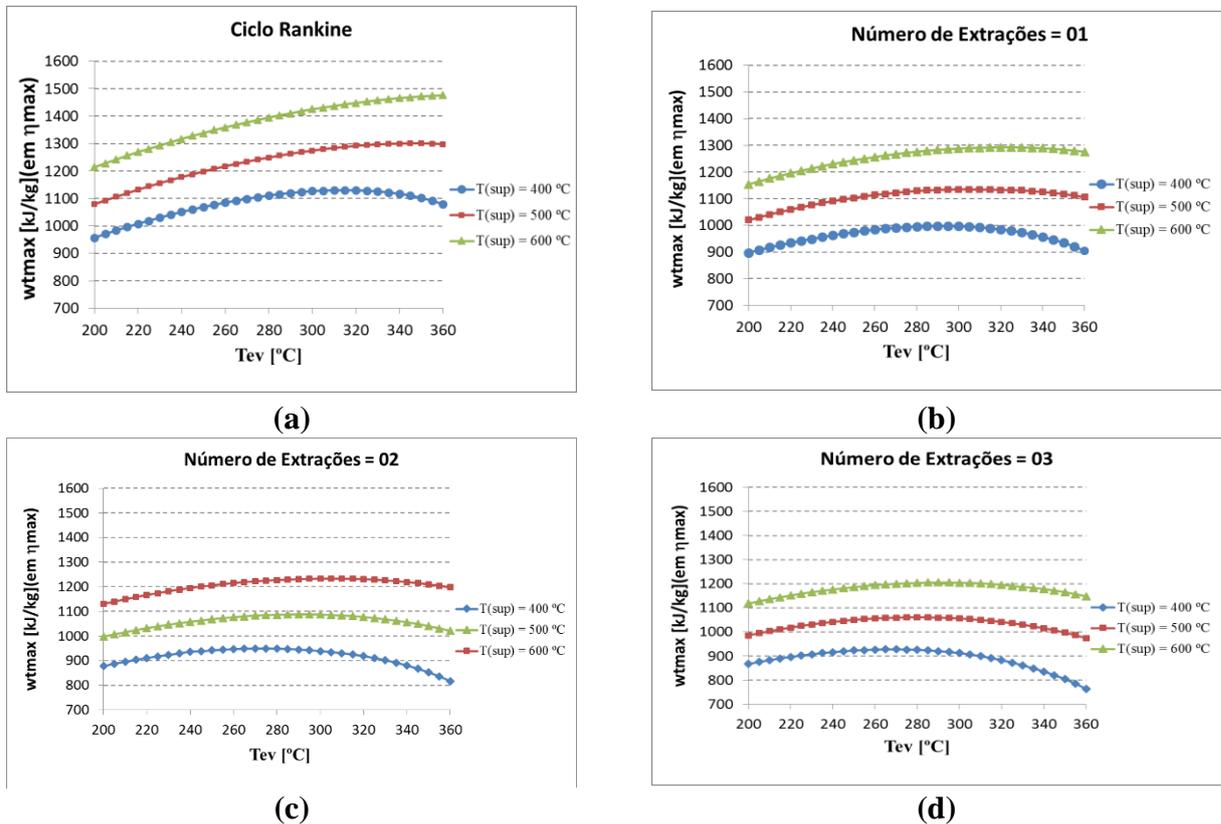
A determinação do comportamento das frações de pressão foi importante para agilizar o tempo de simulação no Software, reduzindo o tempo de interação de semanas ou meses para horas ou dias.

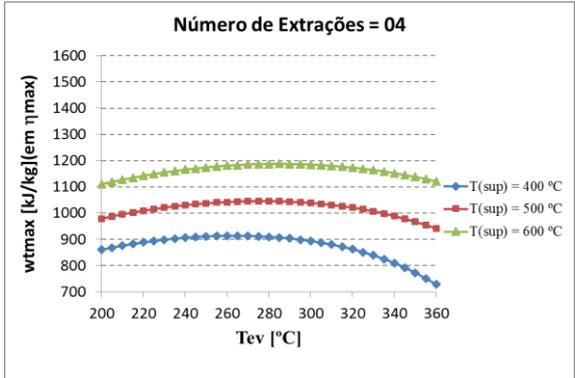
No algoritmo do programa, foram feitas combinações com as diversas extrações de pressão para encontrar a eficiência máxima. Tais combinações eram feitas, inicialmente, com incremento de 1 kPa, porém, percebeu-se que a eficiência não era tão sensível assim com a pressão, possibilitando, dessa forma, ser usado incremento de até 10 ou 15 kPa. Assim, foi possível obter uma interação mais rápida.

6.4. Trabalho total para eficiência máxima em função da temperatura de evaporação.

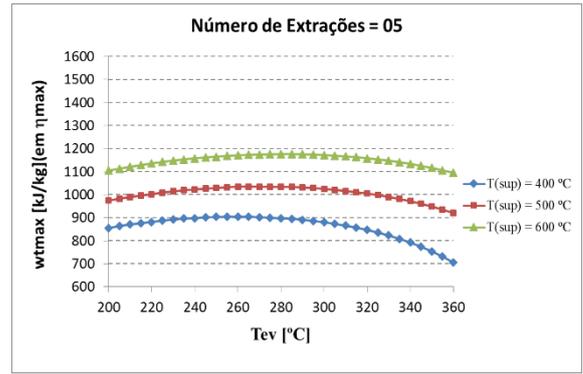
O comportamento de W_{tmax} , do ciclo Rankine e Regenerativo (de 1 a 5 extrações) em função da temperatura de evaporação, T_{ev} , (200 °C a 360 °C) e da temperatura de superaquecimento, T_{sup} (400 °C, 500 °C, 600 °C), é mostrado na Figura 10.

Figura 10 - Trabalho total (para eficiência máxima) em função de T_{ev} e T_{sup} para o Ciclo: (a) Rankine; (b) com 01 extração; (c) 02 extrações; (d) 03 extrações; (e) 04 extrações; (f) 05 extrações.





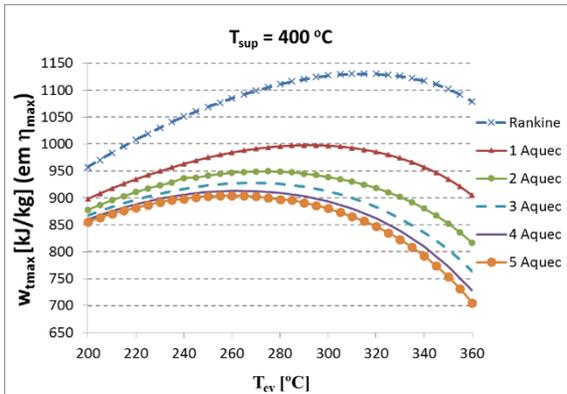
(e)



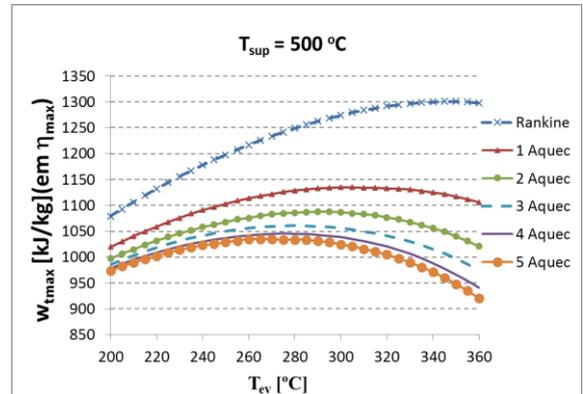
(f)

Os próximos três gráficos da Figura 11 são a superposição dos gráficos da Figura 10 para cada T_{sup} aqui considerada, possibilitando uma análise comparativa mais objetiva.

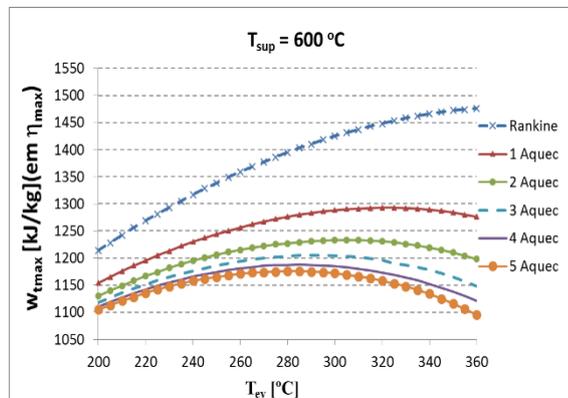
Figura 11 - Comparação do trabalho total na eficiência máxima entre os diversos ciclos, de 0 até 5 extrações para T_{sup} de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C



(a)



(b)



(c)

Nos gráficos Figura 10 percebe-se que os gráficos têm um aspecto semelhante entre si, apresentando visualmente um deslocamento vertical com a variação de T_{sup} .

O trabalho total mencionado aqui é todo trabalho realizado pela turbina quando da eficiência máxima. Das Figuras 10 e 11, nota-se que o trabalho total aumenta com o aumento da temperatura de superaquecimento, independente da temperatura de evaporação. Por outro lado, o trabalho total aumenta com o aumento da temperatura de evaporação até atingir um valor máximo que não significa ser o valor máximo da eficiência máxima.

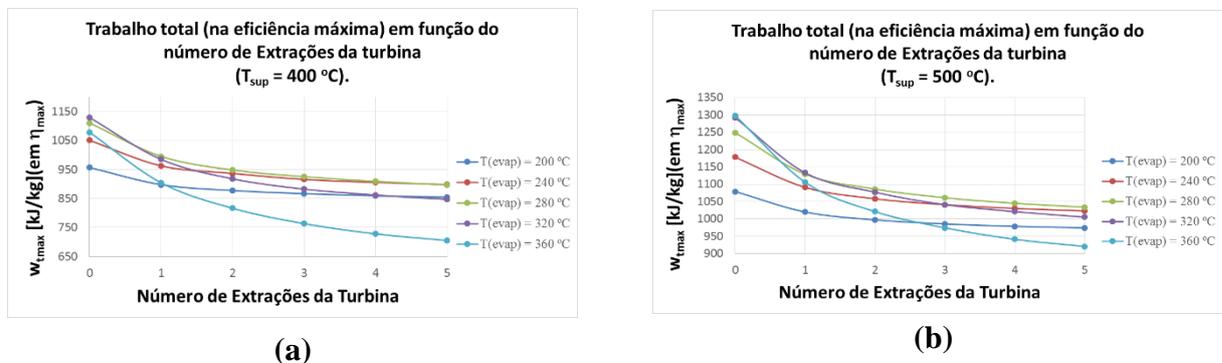
Ainda, verifica-se que o trabalho decresce cada vez menos com o aumento do número de aquecedores. Isso já era esperado, visto que com o aumento do número de aquecedores faz com que haja mais extrações, diminuindo o trabalho total da turbina.

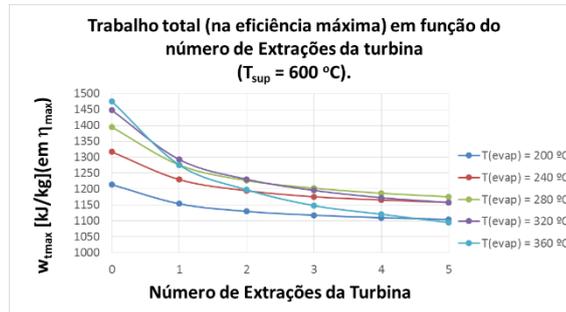
Outra conclusão é que o aumento da temperatura de superaquecimento, faz com que a curva tenha um formato mais linear, fazendo com que o trabalho total apresente um máximo em temperaturas maiores de evaporação.

6.5. Trabalho total na eficiência máxima em função do número extrações na turbina

Os gráficos da Figura 12 apresentam o trabalho total (na eficiência máxima) em função do número de aquecedores, para as temperaturas de superaquecimento de 400 °C, 500 °C e 600 °C e determinadas temperaturas de evaporação.

Figura 12 - Trabalho total (na eficiência máxima) em função do número de extrações da turbina para T_{sup} de: (a) 400 °C; (b) 500 °C; (c) 600 °C.





(c)

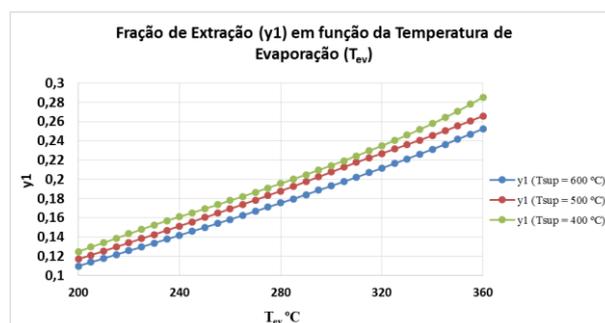
Dos gráficos da Figura 12 percebe-se claramente a diminuição do trabalho total (na eficiência máxima) com o aumento do número de extração, como já era de se esperar, pois quanto mais extrações se faz, menos trabalho realiza a turbina. Isso ocorre nas três temperaturas de superaquecimento (400 °C, 500 °C e 600 °C) para diversas temperaturas de evaporação fixas.

Dos mesmos gráficos, verifica-se que há um decaimento maior do trabalho para maiores valores de T_{ev} . Isso ocorre devido ao aumento da fração de extração na turbina com o aumento de T_{ev} como mostra a Figura 13. Embora a Figura 13 represente a fração de extração da turbina para um ciclo com apenas um aquecedor, esse aumento é verificado nos demais ciclos (de 2 a 5 aquecedores). Portanto, em uma temperatura de evaporação maior ocorre maior extração da turbina.

Sabendo que o aumento no número de extração e o aumento da temperatura de evaporação contribuem para a redução do trabalho na turbina, pode ser preferível trabalhar com T_{ev} menor quando aumentamos o número de extrações.

Da Figura 13, verifica-se ainda que em temperaturas de superaquecimento menor ocorre maior valor de extração na turbina.

Figura 13 - Fração de Extração (y_1) em função da Temperatura de Evaporação (T_{ev}) para um ciclo Regenerativo com apenas uma extração da turbina



7. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

7.1. Conclusão

Nesse trabalho foi possível um estudo analítico da eficiência máxima no ciclo Rankine Regenerativo. Embora já se sabia que o aumento no número de extrações, o aumento da temperatura de superaquecimento e de evaporação aumentaria a eficiência do ciclo, não se sabia como se comportava tal eficiência máxima com a variação desses parâmetros. Para isso, utilizou-se de software (EES) que, através de interações computacionais, foi possível obter uma combinação de valores de pressão de extração que resultaram na eficiência máxima.

Obtida a eficiência máxima, ela foi organizada, analisada e estudada por meio de gráficos gerados no Microsoft Excel. Além disso, foi também analisado o comportamento do trabalho em função dos mesmos parâmetros (número de extração, T_{sup} , T_{ev}).

Dos resultados, verificou-se que o aumento da temperatura de superaquecimento aumenta a eficiência e o trabalho gerado, como era esperado; o aumento da temperatura de evaporação ocasiona o aumento contínuo da eficiência, mas o trabalho da turbina atinge um valor máximo que não significa ser o valor máximo de eficiência do ciclo; o aumento do número de aquecedores e da temperatura de evaporação melhora a eficiência do ciclo, porém, diminuí o trabalho da turbina; ainda, o aumento do número de aquecedores, melhora a eficiência do ciclo, mas deixa de ser significativo após 3 extrações, portanto pode ser economicamente inviável.

Foi verificado também que as pressões de extração da turbina seguem uma determinada tendência percentual com pouca variação ao longo das temperaturas de evaporação. Ainda, o aumento na temperatura de evaporação ocasiona um aumento na fração de extração da turbina, reduzindo o trabalho da mesma.

O ciclo analisado é uma idealização dos ciclos de potência a vapor reais, podendo ser tomado como um modelo de referência para projetos reais que trabalham conforme o ciclo Rankine Regenerativo. Assim, com esse estudo, é possível decidir-se sobre a viabilidade de um projeto de uma máquina que trabalha de acordo com esse ciclo e com determinado número de aquecedores.

7.2. Trabalhos futuros

Como possíveis trabalhos futuros pode-se:

- Analisar mesma pesquisa feita aqui, porém com a introdução de fluidos orgânicos ao invés de água. Objetivando a comparação da eficiência.
- Obter e analisar o comportamento do trabalho total máximo. Visto que o que foi feito nesse trabalho foi a obtenção e análise do trabalho total após encontrada a eficiência máxima.
- Incluir uma análise mais geral da eficiência do ciclo, considerando a eficiência dos equipamentos que compõe o ciclo, principalmente a dos coletores solares.
- Estudar analiticamente a viabilidade econômica para um ciclo com um número alto de extração e comparar com a eficiência térmica.

REFERÊNCIAS

ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

BADR, O.; PROBERT S. D.; O'CALLAGHAN P. **Rankine Cycles for Steam Powerplants**. Applied Energy 36 191-231, 1990.

GOLDEMBERG, J. **Pesquisa e desenvolvimento na área de energia**. São Paulo: Perspec., vol, no.3, p.91-97, 2000.

HAYWOOD, R. W.; **A generalized Analesis of the regenerative steam cycle for a finite number of heaters**. Proc. I. Mech. E. 161, 157, 1949.

PALZ, W. **Energia Solar e Fontes Alternativas**. São Paulo: Hemus, 2002.

PETROBRAS MAGAZINE. **Eficiência energética**. Disponível em: <<http://www.hotspetrobras.com.br/petrobrasmagazine/edicoes/edicao55/pt/eficienciaenergetica/eficienciaenergetica.html>>. Acesso em: 05 Jul. 2016.

QUEIROGA DE ANDRADE, J. R. A.; VIEIRA DA CUNHA, A. F. **Estudo teórico de uma central termoelétrica solar com geração indireta de vapor**. XIX Congresso de Iniciação Científica (CONIC) CTG – UFPE, 2011.

VIEIRA DA CUNHA, A. F.; **Análise do rendimento ótimo de um ciclo regenerativo com uma, duas e três extrações da turbina**. São Luiz: Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM), 2012.

WYLEN, G. J. V.; SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; **Fundamentos da Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: Blucher, 1997.