

# 1

## INTRODUÇÃO

### 1.1

#### OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo estudar as características principais para a implementação de um ciclo Rankine orgânico alimentado por energia solar e definição dos seus principais componentes.

Para tal faz-se necessário definir outros objetivos como pesquisar sobre as tecnologias e aspectos técnicos envolvidos num sistema de coletores concentradores parabólicos que fornecem a energia de entrada. Da mesma forma, deve-se proceder uma completa análise para o funcionamento adequado do ciclo termodinâmico Rankine orgânico.

Para atingir estes objetivos, desenvolveu-se um modelo matemático aproximado, mas realista, dos parâmetros envolvidos no sistema. Isto permitiu a simulação do comportamento de todo o sistema e individualmente de todos os seus componentes, tomando em conta as diversas irreversibilidades e fatores reais que modificam o seu funcionamento com relação ao modelo ideal.

A partir da simulação do modelo adequado é possível obter estimativas da eficiência térmica total e eficiências parciais dos subsistemas que permitam quantificar o aproveitamento da fonte de energia solar. Considerando uma geração de potência de 50 kW, desenhou-se e dimensionou-se uma planta com armazenamento térmico incluído.

## 1.2

### ENERGIA SOLAR

A energia solar é a energia obtida a partir da radiação (luz e calor) que é emitida pelo Sol. O Sol, a estrela do sistema solar, é um grande reator de fusão de hidrogênio que é transformado em hélio, e gera fótons que são irradiados ao exterior da estrela. De fato, a energia emitida é a maior fonte utilizada nos processos biológicos e climáticos da Terra. Embora, a distância entre a Terra e o Sol seja de aproximadamente 150 000 000 km, o fluxo energético que recebe uma superfície perpendicular à radiação fora da atmosfera é, em média, de 1367 W/m<sup>2</sup>, valor considerado como a constante solar [1].

Esta energia, bem aproveitada pode satisfazer às necessidades energéticas da Terra. Fala-se de uma energia de ao redor de 3 850 000 EJ ( $3,85 \times 10^{24}$  J) [2], quantidade suficiente para prover energia ao planeta de maneira sustentável. Considera-se que em 2008, o planeta consumiu  $474 \times 10^{18}$  J de energia. Então a energia solar é um potencial a ser aproveitado, um recurso renovável e sem custo (da fonte).

A energia solar atualmente é aproveitada em duas formas. As tecnologias são distintas, mas, as duas aproveitam a radiação solar incidente. Estas formas são:

- Energia solar fotovoltaica: aproveita a propriedade pela qual as ondas de luz (radiação solar) com certa energia podem arrancar elétrons de determinados materiais e estes são dirigidos em correntes que geram eletricidade.
- Energia solar térmica: transforma a radiação solar em fluxos de calor que são aproveitados em ciclos termodinâmicos para gerar potência, e esta, por sua vez, outras formas de energia como eletricidade, calor, refrigeração, etc.

O presente trabalho se concentra na utilização de energia solar na sua forma térmica. Isto acontecerá com ajuda de coletores solares, os quais serão detalhados mais na frente.

### 1.2.1

#### Radiação solar

A radiação solar é um conjunto de ondas eletromagnéticas na faixa de 0,28 a 3  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda. O espectro solar mostra três tipos de radiação:

- Ultravioleta: é aquela localizada entre 0,28 a 0,38  $\mu\text{m}$ . É a radiação com maior energia, mas, só pertence ao 2% do espectro solar.
- Visível: vai de 0,38 a 0,78  $\mu\text{m}$ . É radiação percebida visualmente e chamada de “luz” solar. Corresponde a 49% do espectro.
- Infravermelha: está entre 0,78 e 3  $\mu\text{m}$  de comprimento de onda. Não é visível (igual a ultravioleta) e compõe 49% do espectro solar.

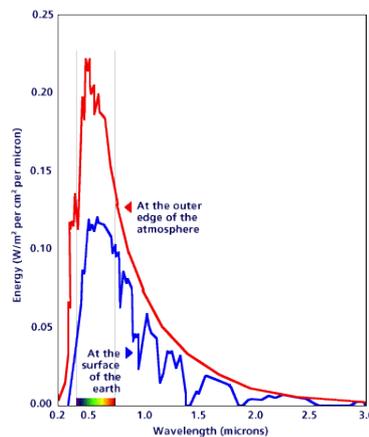


Figura 1.1 – Espectro solar [3]

No espectro solar, para cada valor de comprimento de onda a energia incidente é diferente. Assim mesmo, o comportamento de materiais e superfícies varia com o comprimento de cada onda componente da radiação solar. Porém, são considerados os valores de radiação médios e as propriedades médias para todo o espectro solar, na maioria dos casos práticos e comuns.

Outro enfoque é considerar o Sol como um corpo negro (perfeito absorvedor e emissor de radiação). Nesse caso, a temperatura do Sol, para emitir o mesmo espectro conhecido, seria de 5780 K. Na verdade o Sol não está a uma temperatura constante nem é um corpo negro, mas, corresponde a uma aproximação para calcular o intercâmbio radiativo.

### 1.2.2

#### Tipos de radiação incidente

A radiação solar que chega à superfície terrestre pode vir de diferentes maneiras devido à presença da atmosfera e outras alterações do seu comportamento. A radiação resultante na superfície terrestre não é a mesma em comparação com a radiação fora da atmosfera terrestre (extraterrestre), é a soma de três tipos de radiações incidentes: direta, difusa e refletida.

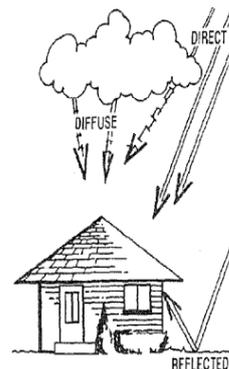


Figura 1.2 – Tipos de radiação incidente [4]

#### Radiação direta

É a radiação que chega numa superfície terrestre sem ter sido sua direção modificada pela ação da atmosfera terrestre ou outra perturbação. É o resultado da radiação extraterrestre que não é absorvida pelas nuvens ou desviada na atmosfera.

#### Radiação difusa

É a radiação que depois de entrar na atmosfera é desviada por ela da sua direção original. A forma desta modificação depende das condições locais e a predição do seu valor não é sempre tão clara.

#### Radiação refletida

Provem do reflexo da radiação que incide sobre outros objetos próximos ao local de interesse. Seu comportamento também é incerto e dependente das condições do lugar. Geralmente, em aplicações importantes é um componente minoritário da radiação total.

### 1.2.3

#### Ângulos solares

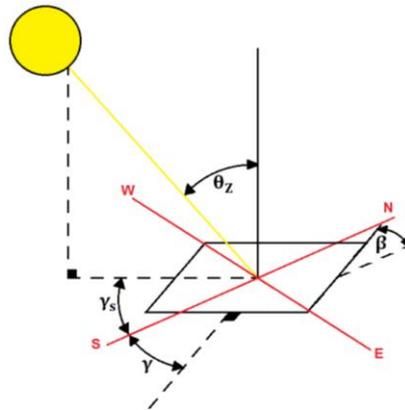


Figura 1.3 - Ângulos solares

- Ângulo de declinação ( $\delta$ ): é o ângulo entre o plano do Equador e a posição solar ao meio-dia no meridiano local. Varia entre  $23,45^\circ$  e  $-23,45^\circ$ , sendo positivo quando está no norte terrestre. É função do dia do ano.
- Ângulo de latitude ( $\phi$ ): determina a locação geográfica de um ponto na Terra com respeito à linha do equador. Varia entre  $90^\circ$  para o pólo norte e  $-90^\circ$  para o pólo sul.
- Ângulo horário ( $\omega$ ): mede o deslocamento angular do sol em direção leste ou oeste com respeito ao meridiano local. Varia em  $15^\circ$  por cada hora tendo como referencia o meio- dia. Positivo na tarde, negativo na manhã.
- Ângulo de inclinação do coletor ( $\beta$ ): é o ângulo presente entre o plano do coletor e o plano horizontal. Para concentradores parabólicos é o ângulo existente entre a superfície da área de abertura e o plano horizontal.
- Ângulo de azimute de superfície ( $\gamma$ ): formado entre a direção sul e a projeção da normal à superfície do coletor. Para um concentrador parabólico, seria a normal à área de abertura. O ângulo é positivo se gira para o oeste ou negativo, para o leste. Varia entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Ângulo de azimute solar ( $\gamma_s$ ): formado entre a direção sul e a projeção dos raios solares à superfície horizontal. O ângulo é positivo se gira para o oeste ou negativo, para o leste. Varia entre  $-180^\circ$  e  $180^\circ$ .
- Ângulo de incidência ( $\theta$ ): formado entre os raios solares incidentes na superfície coletora (ou de abertura) e a normal a essa superfície.

- Ângulo de Zenith ( $\theta_z$ ): formado pelos raios solares e a vertical. É o ângulo de incidência para uma superfície horizontal.

### 1.3

#### COLETORES CONCENTRADORES LINEARES PARABÓLICOS

Um coletor solar aproveita a radiação solar e a transforma em energia térmica para dar-lhe uma aplicação posterior. Existem alguns tipos de coletores: planos, Fresnel, cilíndricos, etc. No presente trabalho serão considerados os chamados coletores concentradores lineares parabólicos, por seu interesse tecnológico e versatilidade.

Um coletor concentrador linear parabólico é um sistema que concentra a energia solar incidente numa determinada superfície em outra superfície absorvedora menor com ajuda de um dispositivo óptico (geralmente um espelho refletor). Esta concentração vai acontecer em torno à linha focal formado pela superfície parabólica do refletor. Os principais componentes destes coletores são:

- Refletor: é a superfície sobre a qual chegam os raios solares e refletem como em um espelho em direção ao receptor.
- Receptor: é a parte do coletor encarregada de receber a radiação refletida opticamente pelo refletor. Tem duas partes principais:
  - Absorvedor: é a superfície que tem a função de absorver a maior quantidade de radiação solar que chega a ela.
  - Cobertura: é um elemento que cobre o absorvedor, facilitando a transmissão de energia solar para o absorvedor, mas, dificultando as perdas de energia térmica, especialmente as perdas por convecção.
- Estrutura de suporte: é uma estrutura montada para manter os componentes destes coletores e ao mesmo tempo dar-lhes resistência a cargas externas como ventos, tornados, tremores, etc.

- Sistema de movimento: diferentes dispositivos que permitem a rotação do refletor de modo de seguir a direção da radiação direta do Sol.



Figura 1.4 – Partes de um coletor concentrador linear parabólico [5]

### 1.3.1

#### Geometria do coletor concentrador linear parabólico

Os concentradores lineares parabólicos como seu nome indica são superfícies projetadas linearmente a partir de um perfil parabólico. Este perfil apresenta algumas importantes características geométricas que têm de ser observadas durante a construção e o funcionamento dos sistemas de coletores solares. A eficiência e capacidade do coletor dependerão em grande medida da precisão das formas do coletor.

#### 1.3.1.1

##### Definição geral da parábola

Uma parábola é a curva cujos pontos sempre se mantêm eqüidistantes a um ponto, chamado ponto focal (F), e a uma linha reta (L), chamada de diretriz da parábola. A parábola também é conhecida por ser uma das chamadas curvas

cônicas, já que também se gera na interseção do cone com um plano paralelo à reta geratriz deste sólido.

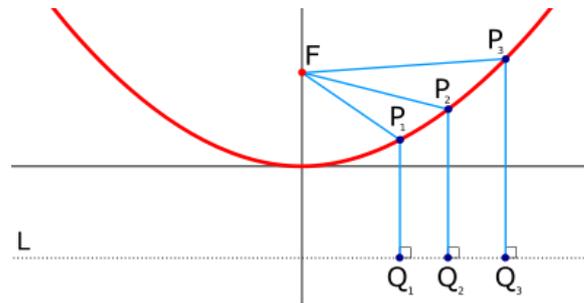


Figura 1.5 – Parábola [6]

**Ponto focal da parábola (F):** este ponto está situado na linha de simetria da parábola e define a parábola como explicado no conceito da parábola. No caso dos concentradores solares se gera uma linha focal como resultado dos pontos focais de todas as seções transversais dos coletores. Nesta linha focal coloca-se o absorvedor de energia solar.

**Vértice da parábola (O):** é o ponto da parábola pelo qual passa a linha de simetria. Esta linha também passa pelo ponto focal (F) e é perpendicular à reta diretriz da parábola.

### 1.3.1.2

#### Equação de uma parábola

Uma parábola pode ser expressa matematicamente mediante uma equação de uma função quadrática. Dado um sistema de coordenadas cartesianas  $(x,y)$  com origem no vértice da parábola (O), onde o eixo das abscissas (eixo x) coincide com a linha de simetria da parábola, a equação é:

$$y^2 = 4fx \quad (1.1)$$

Onde,  $f$ , é definida como distancia focal, ou distancia entre o vértice e o ponto focal da parábola (F).

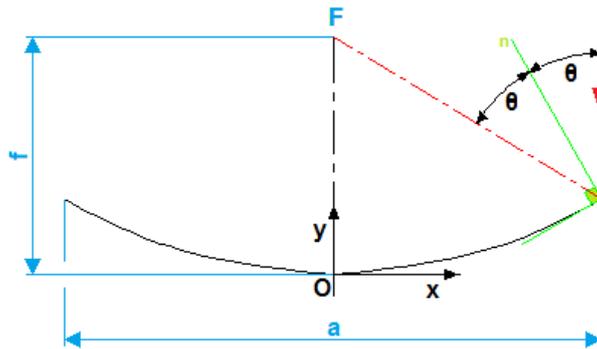


Figura 1.6 – Parábola com vértice num sistema de coordenadas cartesianas

### 1.3.1.3

#### Comprimento da parábola

É possível determinar o comprimento da parábola ( $l$ ) mediante uma equação de integração baseada na equação da parábola e utilizando as coordenadas cartesianas especificadas na figura 1.6:

$$l = \int_{-a/2}^{a/2} \left[ \sqrt{\left(\frac{dx}{dy}\right)^2 + 1} \right] dy \quad (1.2)$$

A partir da equação da parábola, a derivada ( $dx/dy$ ) resulta em:

$$\frac{dx}{dy} = \frac{y}{2f} \quad (1.3)$$

$$l = \int_{-a/2}^{a/2} \frac{1}{2f} (\sqrt{y^2 + 4f^2}) dy \quad (1.4)$$

### 1.3.2

#### Medidas de um coletor concentrador linear parabólico

Definida a parábola como o perfil dos concentradores solares, deve-se estabelecer medidas para sua construção. Geometricamente, é uma linha infinita que mantém suas proporções, cambiando somente a escala de suas medidas. Já o concentrador tem que ter uma medida de largura e um valor para sua distância focal. Ademais, como é uma superfície, precisa-se conhecer o comprimento desta na direção axial. Portanto, é necessário definir dois parâmetros adicionais:

- Abertura (a): é a distancia horizontal (perpendicular ao eixo de simetria) entre os pontos extremos da parábola. A linha de simetria se cruza com a linha de abertura dividindo-a em duas partes iguais.
- Comprimento (L): é a distancia axial por onde se prolonga o perfil parabólico. Durante todo o comprimento a seção parabólica é constante.
- Área de abertura ( $A_a$ ): é a área definida pelo produto de comprimento e a abertura da parábola. Chama-se de abertura porque a representa que o concentrador está “aberto” para a entrada dos raios solares.
- Área de recepção ( $A_r$ ): é a área onde os raios solares vão se concentrar uma vez refletidos pelo concentrador. Esta área contém a linha focal da superfície parabólica. Seria definida como o produto do comprimento pelo diâmetro de recepção. Está contida na área de abertura.

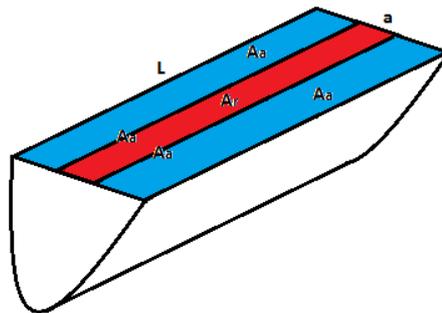


Figura 1.7 - Medidas de um coletor concentrador linear parabólico

### 1.3.3

#### Razão geométrica de concentração solar

É a relação entre as áreas de abertura e a área de recepção. Mostra como o concentrador solar leva a energia solar de um área a outra área C vezes menor. Isto é uma vantagem, porque esta mesma energia vai se concentrar numa área que permite menores perdas de energia, especialmente por mecanismos de convecção e radiação.

$$C = \frac{A_a}{A_r} \quad (1.5)$$

$A_a$ : área de abertura

$A_r$ : área de recepção

A máxima razão geométrica de concentração solar num concentrador linear está dada por [1]:

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{\text{linear,max}} = \frac{1}{\text{sen } \theta_s} \quad (1.6)$$

Onde o ângulo  $\theta_s$  é a metade do ângulo subtendido pelo sol, ou seja, aquele cone de radiação que chega na Terra como efeito do Sol. Seu valor é:

$$\theta_s \approx 16' = 0,267^\circ$$

Então a máxima razão de concentração solar possível é de:

$$\left(\frac{A_a}{A_r}\right)_{\text{linear,max}} = 212 \quad (1.7)$$

### 1.3.4

#### Reflexão dos raios solares na parábola

Conhecendo que os raios solares não são exatamente linhas retas perfeitas, senão mais bem cones de luz, cujo ângulo entre a linha central e o borde é igual ao ângulo  $\theta_s$ , é possível determinar a concentração destes raios segundo a parábola. Como se observa na figura embaixo, a projeção dos raios solares nos extremos da parábola gera um maior diâmetro fazendo centro no ponto focal, que com a projeção dos raios solares que batem no centro da parábola ou outro ponto qualquer.

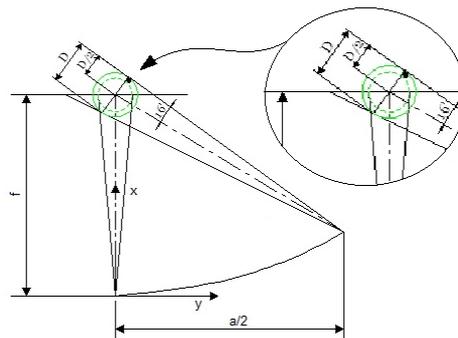


Figura 1.8 – Reflexão dos raios solares no concentrador parabólico

Este diâmetro ( $D$ , na figura 1.8) será chamado de diâmetro de recepção. É nessa circunferência com centro no ponto focal e diâmetro onde se concentrarão os raios solares e terá de ser colocado o elemento coletor de energia solar. Para saber o valor desse diâmetro em função de outros valores conhecidos da parábola vai ser utilizada uma relação trigonométrica do ângulo  $\theta_s$ :

$$\text{sen } 0,267 = \frac{D/2}{\sqrt{\frac{a^2}{4} + \left(f - \frac{a^2}{16f}\right)^2}} \quad (1.8)$$

Lembrando também que a razão geométrica de concentração máxima para um concentrador linear é de 212 temos que:

$$\frac{a}{D} = 212 \quad (1.9)$$

Substituindo na equação anterior:

$$\text{sen } 0,267 = \frac{2af}{53(a^2 + 16f^2)} \quad (1.10a)$$

$$53\text{sen } 0,267a^2 + 848\text{sen}0,267f^2 = 2af \quad (1.10b)$$

Esta nova equação relaciona a abertura (a) com a distância focal (f) somente. Sendo uma função quadrática, para uma determinada abertura são possíveis dois valores de solução para a distância focal:

$$a = 4,676 f_1 \quad (1.11)$$

$$a = 3,422 f_2 \quad (1.12)$$

Com a fórmula do comprimento da parábola em função de a e f, é possível obter este valor conhecendo as duas variáveis antes citadas. Mas, como já se deduziu a em função de f, pode-se deixar o comprimento só em função da distancia focal. Como para uma mesma abertura eram possíveis dos valores de distancia focal, para uma mesma abertura são possíveis dois comprimentos da parábola.

$$l_1 = 5,589 f_1 \quad (1.13)$$

$$l_2 = 3,803 f_2 \quad (1.14)$$

Como o objetivo é ter o menor comprimento de parábola por motivos construtivos e de material o ótimo é adotar o comprimento mais curto. Para maior compreensão do fato de que para uma mesma abertura podem existir duas possíveis parábolas que cumpram a máxima razão de concentração solar se mostra na seguinte figura:

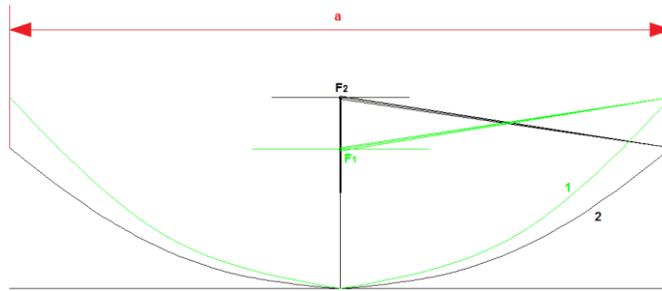


Figura 1.9 Duas parábolas possíveis para uma mesma abertura e igual razão geométrica de concentração

### 1.3.5

#### Ângulo de seguimento do sol para concentradores lineares parabólicos

Os sistemas de movimento utilizados para fazer o seguimento da radiação solar direta descrevem diferentes rotações para atingir o objetivo de aproveitar ao máximo a energia do Sol. Estas rotações podem ser efetuadas ao redor de um determinado eixo ou também rotações em dois eixos. Para concentradores lineares parabólicos se tem dois tipos de rotação uniaxial: ao redor do eixo horizontal oeste – leste e ao redor do eixo horizontal norte –sul.

#### 1.3.5.1

##### Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal oeste – leste com ajuste diário

O ângulo de inclinação do concentrador solar para ser modificado uma só vez diariamente, com o objetivo de que a radiação solar direta seja normal à superfície de abertura ao meio dia (ou seja  $\theta = 0$ ), é:

$$\beta = |\varphi - \delta| \quad (1.15)$$

Conhecido o ângulo de inclinação, é necessário conhecer a orientação dessa superfície inclinada. É óbvio que o ângulo de azimute de superfície só pode ser 0 ou 180°, nos seguintes casos:

$$\begin{aligned} \gamma &= 0 \text{ quando } (\varphi - \delta) > 0 \\ \gamma &= 180^\circ \text{ quando } (\varphi - \delta) < 0 \end{aligned} \quad (1.16)$$

E o ângulo de incidência pode ser calculado pela equação:

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cdot \cos \omega \quad (1.17)$$

### 1.3.5.2

#### Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal oeste – leste com ajuste contínuo

O ângulo de inclinação do concentrador solar com ajuste contínuo na rotação oeste – leste é determinado assim:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s| \quad (1.18)$$

Conhecido o ângulo de inclinação, é necessário conhecer a orientação da superfície inclinada. Para este caso, o ângulo de azimute de superfície só pode ser 0 ou 180°, cambiando de valor quando o ângulo de azimute solar passa por  $\pm 90^\circ$ :

$$\begin{aligned} \gamma &= 0 \text{ quando } |\gamma_s| > 90^\circ \\ \gamma &= 180^\circ \text{ quando } |\gamma_s| < 90^\circ \end{aligned} \quad (1.19)$$

E o ângulo de incidência pode ser calculado pela equação:

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (1.20)$$

### 1.3.5.3

#### Rotação uniaxial ao redor do eixo horizontal norte – sul com ajuste contínuo

O ângulo de inclinação do concentrador solar a ser continuamente ajustado para minimizar o ângulo de incidência é dado pela seguinte equação:

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (1.21)$$

Conhece-se que:

$$\theta_z = \arccos (\sin \delta \cdot \sin \varnothing + \cos \delta \cdot \cos \varnothing \cdot \cos \omega) \quad (1.22)$$

Então o ângulo de inclinação toma a seguinte forma:

$$\tan \beta = \tan [\arccos (\sin \delta \cdot \sin \varnothing + \cos \delta \cdot \cos \varnothing \cdot \cos \omega)] |\cos(\gamma - \gamma_s)| \quad (1.23)$$

Note-se que este ângulo está em função do ângulo horário, portanto tem que se adaptar segundo esta função.

E o ângulo de incidência pode ser calculado pela equação:

$$\cos \theta = (\cos^2 \theta_z + \cos^2 \delta \cdot \sin^2 \omega)^{1/2} \quad (1.24)$$

### 1.3.6

#### Eficiência óptica do coletor

A eficiência óptica é a razão entre a energia solar absorvida no coletor e a energia solar incidente no concentrador (em forma de radiação direta). Certamente, nem toda a energia incidente inicial chegará a se concentrar no coletor e ser absorvida pelo equipamento. Certas características fazem que existam perdas desta energia. A eficiência óptica vem dada pela equação:

$$\eta_{\text{ópt}} = \frac{S}{I_b} = \rho(\gamma\tau\alpha)_n K_{\gamma\tau\alpha} \quad (1.25)$$

Onde:

S: radiação incidente no receptor

$I_b$ : radiação direta no plano de abertura

A continuação se explicam os diferentes fatores que determinam a eficiência óptica:

- Refletância especular ( $\rho$ ): é a porcentagem de radiação refletida specularmente. Numa superfície especular a radiação incidente se reflete com o mesmo ângulo de incidência, relativa à normal à superfície. Na prática, nem toda a radiação é refletida specularmente, já que parte é direcionada em qualquer direção aleatória, de forma difusa.

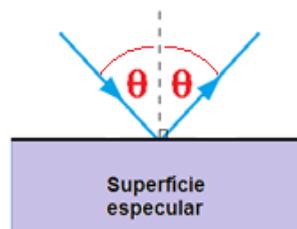


Figura 1.10 – Reflexão de luz numa superfície especular perfeita

- Fator de intercepção ( $\gamma$ ): é a porcentagem de radiação refletida pelo concentrador que chega a incidir sobre o coletor solar. Este fator depende em grande medida do ângulo de incidência e das medidas dos concentradores solares.
- Transmissividade da cobertura ( $\tau$ ): é uma propriedade do material da cobertura que indica que porcentagem da radiação esta deixa passar. Os

absorvedores têm coberturas para reduzir as perdas térmicas. Ademais, o ângulo de incidência influirá decisivamente neste valor.

- Absortância do receptor ( $\alpha$ ): é a porcentagem da radiação que chega ao receptor que este material pode absorver. Também o ângulo de incidência está relacionado a esta propriedade.
- Fator de correção ( $K_{\gamma\tau\alpha}$ ): é um fator que corrige possíveis desvios, principalmente no ângulo de incidência estimado. Erros no seguimento, alinhamento, etc. também podem influir e é necessário melhorar a precisão do sistema concentrador.

### 1.3.7

#### Vantagens dos coletores concentradores lineares parabólicos

- Concentram a energia solar numa área relativamente pequena, onde as perdas térmicas por convecção, radiação e condução são menores.
- A concentração de energia solar permite alcançar maiores temperaturas que em coletores sem concentração ou de concentrações baixas.
- Com o movimento do refletor é possível seguir a posição dos raios solares para que estes se reflitam no receptor.
- Pode-se arranjar uma série de concentradores tanto em série como em paralelo para aproveitar a maior quantidade de energia solar num sítio. Precisa-se apenas do movimento do refletor para o seguimento do Sol e não de muitos componentes como em outros sistemas.

### 1.3.8

#### Desvantagens dos coletores concentradores lineares parabólicos

- Só são concentrados os fluxos de radiação direta dos raios paralelos ao plano de simetria dos concentradores solares parabólicos.
- O concentrador requer precisão no movimento de seguimento à posição do Sol para funcionar eficientemente.

- Presença abundante de nuvens ou sombras reduz a capacidade de concentrar a radiação direta do Sol.
- Os componentes do sistema estão expostos às condições ambientais externas como poeira, ventos fortes, etc.

#### 1.4

#### **CICLO RANKINE ORGÂNICO**

Um ciclo Rankine orgânico é um ciclo de geração de potência que funciona analogamente a um ciclo Rankine de vapor de água. A diferença fundamental está no uso de fluido orgânico como fluido de trabalho no Rankine orgânico. Os processos ideais fundamentais que cumpre um ciclo Rankine orgânico são:

- Compressão isentrópica
- Fornecimento de calor a pressão constante
- Expansão isentrópica
- Rejeição de calor a pressão constante

Este tipo de ciclo Rankine é utilizado para aproveitar fontes de calor de temperatura menor à que pode alcançar o vapor numa caldeira de um ciclo Rankine tradicional. Por exemplo, para aproveitar a energia geotérmica do subsolo, a energia solar térmica, calor de rejeito de processos industriais, etc.

Pelas características da grande maioria dos fluidos orgânicos regularmente utilizados neste ciclo, a expansão, mesmo sendo isentrópica ou não, não termina na zona de saturação líquido-vapor. Este processo de expansão vai terminar na zona de vapor superaquecido, pelo qual é desejável a utilização de um recuperador. O recuperador aproveita a energia deste vapor superaquecido, levando-o até a linha de vapor saturado. Depois deste processo vem a rejeição de calor num condensador. A energia aproveitada pelo recuperador serve para efetuar um pré-aquecimento no fluido antes do fornecimento de calor efetuado pela fonte externa de calor.

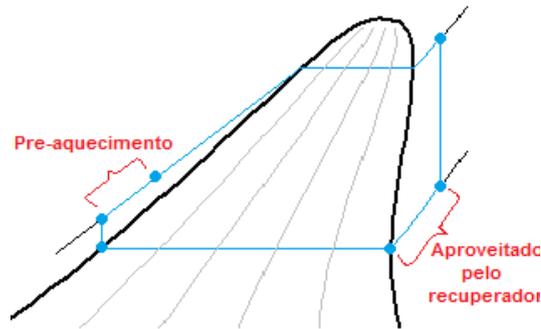


Figura 1.11 – Aproveitamento de vapor superaquecido com recuperador

### 1.4.1

#### Balanço energético do ciclo Rankine orgânico

Como em todo ciclo termodinâmico, no ciclo Rankine orgânico acontecem processos de entrada e saída de energia em suas formas de trabalho e calor. Para conhecer o comportamento do sistema é necessário identificar e quantificar estas formas de energia.

Segundo a primeira lei da Termodinâmica, a variação da energia em um sistema fechado depende das transferências de calor ( $Q$ ) e trabalho ( $W$ ). No balanço, na equação clássica, assume-se que o calor que entra ao sistema é positivo (o que sai é negativo) e o trabalho entregue pelo sistema é positivo (o que entra é negativo). Então esta equação fica assim:

$$Q - W = \Delta E \quad (1.26)$$

A variação de energia ( $\Delta E$ ), no presente caso, é nula, já que sendo um ciclo estacionário as variações das energias cinemática e potencial são nulas. Ademais, a variação da energia interna é também nula pois se trata de um ciclo em regime permanente. Então:

$$\Delta E = 0 \quad (1.27)$$

$$Q = W \quad (1.28)$$

Para o ciclo Rankine, em geral, interessam os trabalhos e calores específicos (por unidade de massa), já que ainda não se conhece o tamanho ou capacidade do sistema. Estes processos são os seguintes:

- Existe uma entrada ou admissão de calor no sistema ( $q_e$ ), idealmente a pressão constante, passando o fluido do estado sub-resfriado ao superaquecimento.
- É necessária uma rejeição de calor ( $q_s$ ), também no ciclo ideal a pressão constante, levando o fluido de estado superaquecido a um estado de líquido saturado. No caso de que um dispositivo recuperador aproveitasse a energia toda da fase superaquecida, então esta rejeição começaria na linha de vapor saturado.
- Para levar o fluido no estado de líquido saturado da pressão baixa até a pressão alta é preciso um trabalho externo ou de entrada ( $w_e$ ). Este trabalho vai se efetuar na zona de líquido sub-resfriado com uma pequena elevação de temperatura, idealmente a entropia constante.
- A partir do ponto de pressão alta e temperatura máxima, o fluido é expandido num dispositivo com o objetivo de efetuar um trabalho de saída ( $w_s$ ). Este trabalho abandona o sistema e é utilizado na geração de energia útil. Idealmente, é efetuado com entropia constante e, para os fluidos orgânicos, na zona de superaquecimento.

O balanço de energia no ciclo Rankine orgânico é da seguinte forma:

$$q_e - q_s = w_s - w_e \quad (1.29)$$

A diferença entre o trabalho de saída e o trabalho de entrada é conhecida como trabalho útil. Este é o trabalho específico a ser aproveitado no ciclo:

$$w_u = w_s - w_e \quad (1.30)$$

Vale a pena também fazer um balanço no dispositivo recuperador. Como foi dito anteriormente o recuperador aproveita a energia do fluido já expandido ( $q_a$ ) que permanece em estado superaquecido (parte ou o total deste potencial até a linha de vapor saturado) e transfere calor ( $q_t$ ) para pre-aquecer o fluido antes do ingresso de calor externo. Este calor tomado e depois transferido pelo recuperador fica no sistema, portanto, não abandona o ciclo e não aparece no balanço geral do ciclo, ou seja, em condições ideais:

$$q_a = q_t \quad (1.31)$$

Adotando a numeração dos processos que se mostra na figura 1.12, o balanço de energia no recuperador fica em função das entalpias específicas:

$$h_3 - h_2 = h_5 - h_6 \quad (1.32)$$

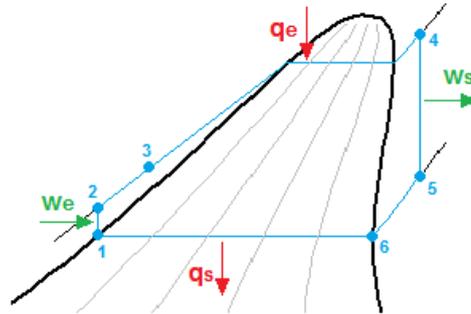


Figura 1.12 – Esquema do ciclo Rankine orgânico

De maneira análoga, os trabalhos e calores específicos já mencionados se quantificam com as entalpias respectivas:

$$w_e = h_2 - h_1 \quad (1.33)$$

$$w_s = h_4 - h_5 \quad (1.34)$$

$$q_e = h_4 - h_3 \quad (1.35)$$

$$q_s = h_6 - h_1 \quad (1.36)$$

Lembrando que, os processos de expansão e compressão são idealmente desenhados como isentrópicos, pelo qual as entropias respectivas são iguais:

$$s_1 = s_2 \quad (1.37)$$

$$s_4 = s_5 \quad (1.38)$$

Finalmente, a eficiência termodinâmica do ciclo define-se como o quociente entre o trabalho útil e o calor de entrada ao sistema, ou em termos do presente ciclo Rankine orgânico:

$$\eta = \frac{w_u}{q_e} = 1 - \frac{q_s}{q_e} \quad (1.39)$$

#### 1.4.2

##### Irreversibilidades no ciclo Rankine

O comportamento ideal num ciclo Rankine, na prática não se cumpre, devido à presença de irreversibilidades em diferentes componentes do sistema.

Essas irreversibilidades limitam a eficiência térmica do ciclo e, portanto, geram menor trabalho útil para ser aproveitado. As principais irreversibilidades são:

- A expansão que ocorre no ciclo não é isentrópica. Esta expansão acontece em turbinas onde parte da energia é desperdiçada como calor rejeitado e para vencer o atrito mecânico próprio de mecanismos rotativos.
- Durante os processos de intercambio de calor (entrada e rejeição) ocorrem perdas de pressão no fluido de trabalho. Nestes equipamentos de intercambio de calor o fluido tem que percorrer longas tubulações para garantir uma transferência adequada, o que gera quedas de pressão que diminuem o trabalho útil.
- Nos trocadores de calor, parte da energia a ser trocada escapa do sistema de forma não desejada, mesmo com isolamento. Nos ciclos idéias, assume-se que os fluxos energéticos são estabelecidos.

### **1.4.3**

#### **Fluido de trabalho no ciclo Rankine orgânico**

O ciclo Rankine orgânico se caracteriza por utilizar como fluido de trabalho um composto orgânico. O nome orgânico é usado para compostos baseados na chamada química do carbono ou orgânica. Dentro desta disciplina se estudam uma grande variedade de substâncias, algumas muito diferentes entre si. Mas, já dentro da aplicação deste ciclo são consideradas principalmente substâncias utilizadas como refrigerantes.

Um refrigerante é um fluido empregado em ciclos termodinâmicos que têm como objetivo transferir calor com diferentes propósitos. As substâncias mais utilizadas como refrigerantes são os fluorocarbonetos e os hidrocarbonetos, entre outras categorias químicas.

#### **1.4.3.1**

##### **Motivação para o uso de fluido orgânico num ciclo Rankine**

A principal motivação para o uso de fluidos orgânicos em substituição à água em um ciclo Rankine, é a menor temperatura da fonte de calor (geralmente

inferior a 300 °C). Um ciclo Rankine com água é mais eficiente com um alto grau de superaquecimento. Como se observa na figura 1.13, a água para baixas temperaturas dificilmente poderá alcançar um alto grau de superaquecimento, ou o poderá fazer a pressões menores às usuais num ciclo Rankine tradicional. Portanto, com menor pressão, menor entalpia no estado inicial da expansão e menor eficiência e trabalho útil. Na prática, o uso de água num ciclo com fonte de calor de baixa temperatura implicaria na necessidade de vários reaquecimentos e re-expansões.

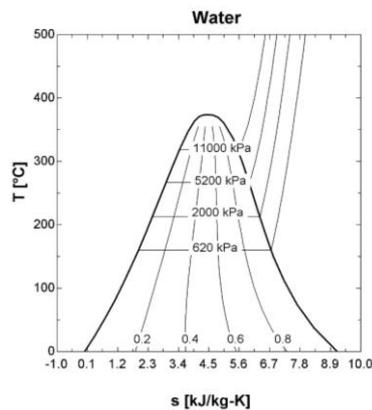


Figura 1.13 – Diagrama T-s para água gerado em EES

Por outro lado, os compostos orgânicos que são utilizados em ciclos Rankine têm níveis de pressão aceitavelmente altos para temperaturas baixas, como aquelas fornecidas por fontes de baixa temperatura. Então se dá um melhor aproveitamento para essas condições de operação. Na figura 1.14 se mostram os diagramas T-s de dois fluidos orgânicos conhecidos:

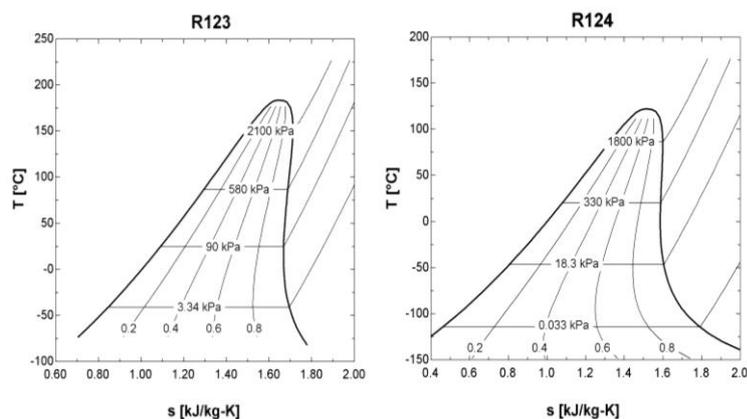


Figura 1.14 – Diagramas T-s para os refrigerantes R123 e R124 gerados em EES

### 1.4.3.2

#### Características desejadas para a seleção do fluido de trabalho orgânico

O fluido de trabalho de um ciclo Rankine orgânico tem que possuir certas características para ser capaz de aproveitar a energia de uma fonte de calor de baixa temperatura. Os processos termodinâmicos básicos de um ciclo Rankine têm que ser cumpridos com este fluido de trabalho. As substâncias que mostrarem a maior eficiência e possam alcançar o maior trabalho útil possível no ciclo serão as mais adequadas para sua implementação.

Além disso, é fundamental que este fluido apresente segurança, tanto para o meio-ambiente, o processo e as instalações. Os fluidos mais empregados num ciclo Rankine orgânico são os refrigerantes e outros compostos, principalmente hidrocarbonetos e suas misturas. Alguns aspectos importantes a serem observados para o fluido de trabalho são:

- Impacto ambiental
- Temperatura crítica
- Pressão crítica
- Temperatura de degradação
- Disponibilidade comercial

#### 1.4.3.2.1

##### Impacto ambiental

O principal problema de uma grande quantidade de compostos orgânicos é o impacto na camada de ozônio. Algumas substâncias empregadas principalmente como refrigerantes estão atualmente proibidas, na utilização e produção, exceto para aplicações especiais, como na indústria médica. Em 1996 entrou em vigor o Protocolo de Montreal (assinado em 1987), acordo entre os países para tentar deter a destruição da camada de ozônio. Este tratado proibiu o uso de substâncias agressivas a esta camada da atmosfera, em especial compostos clorofluorocarbonetos (CFCs). Entre estes compostos estão:

- R-11
- R-12

- R-113
- R-114
- R-115
- R-500

Adicionalmente, outras substâncias terão que ser eliminadas paulatinamente, como os hidrobromofluorocarbonetos (HBFCs) até 2015 e os hidroclorofluorocarbonetos (HCFCs) até 2040. Deste último grupo os conhecidos refrigerantes R-22 e R-123 irão ser substituídos por fases desde 2015 até 2040, mas, ainda serão permitidos durante esta etapa transitória.

O critério para determinar a capacidade de destruir a camada de ozônio é chamado de ODP (ozone depletion potential). A medida padrão é o potencial destrutivo do R-11 igual a 1. Outro valor será a comparação do dano que pode causar uma quantidade de massa de uma substância igual à mesma massa de R-11. O valor de 0 quer dizer nenhum dano provocado ao ozônio.

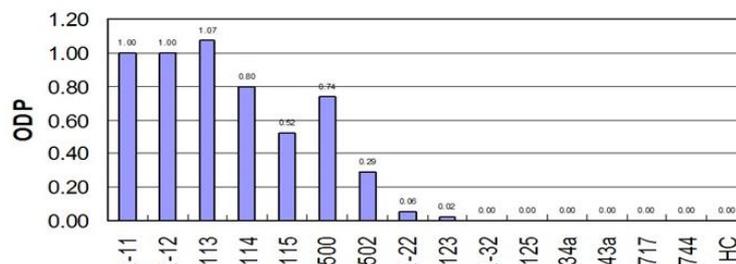


Figura 1.15 – ODP para diversos refrigerantes [7]

#### 1.4.3.2.2

##### Temperatura crítica

Outro fator importante no desempenho de um fluido orgânico é a temperatura crítica. Esta é a temperatura no ponto termodinâmico no qual desaparece a diferenciação entre a fase líquida da fase gasosa. Lembre-se que, em termos gerais, qualquer ciclo termodinâmico tem maior eficiência a medida que o fluido de trabalho atinge maiores temperaturas a partir da fonte de calor.

Embora, esta temperatura possa ser ultrapassada, num estado transcrito, é preferível utilizar uma substância cuja temperatura crítica permita que o ganho de calor aconteça antes do ponto crítico. Desta maneira, utilizando um

fluido com uma temperatura crítica relativamente alta, não se precisa, na fase de superaquecimento, uma temperatura máxima com uma grande diferença relativa à temperatura de saturação para obter uma boa eficiência térmica.

#### **1.4.3.2.3**

##### **Pressão crítica**

Por outro lado, tentando-se aproximar ao ponto crítico, se a pressão neste ponto resulta ser demasiada alta, o trabalho que o ciclo tem que efetuar para este aumento de pressão vai aumentar consideravelmente. Embora, este trabalho externo de entrada não seja quantitativamente significativo no ciclo Rankine versus o trabalho gerado pelo ciclo, representa uma série de dificuldades técnicas. Para que os equipamentos suportem maiores pressões se requerem materiais mais resistentes e custosos. Então, é preferível ter uma pressão crítica não muito elevada, enquanto seja possível.

#### **1.4.3.2.4**

##### **Temperatura de degradação**

Estes compostos orgânicos resistem a determinados níveis máximos de temperatura. Ultrapassando estes valores de temperatura pode acontecer uma degradação química, ou seja, decomposição da substância em outras substâncias diferentes. Este comportamento, observado no fluido a temperaturas maiores à de degradação, não deve acontecer num processo, porque muitas substâncias surgidas na decomposição afetam a segurança operacional. A estabilidade do fluido de trabalho tem que ser mantida e, com certeza, tem que ser considerada no projeto do ciclo.

#### **1.4.3.2.5**

##### **Disponibilidade comercial**

Os fluidos a serem empregados eventualmente num ciclo Rankine orgânico têm que estar disponíveis no mercado para serem adquiridos com facilidade.

Existem compostos que dificilmente podem ser adquiridos ou encontrados, pelo qual acabam complicando um projeto de implementação do ciclo. Outra vantagem deste aspecto é que um fluido amplamente disponível reduza os custos da sua compra, manutenção e outras despesas, ademais de ter maior possibilidade de ser obtido no mercado local.

#### **1.4.4**

##### **Aplicações do ciclo Rankine orgânico**

O ciclo Rankine orgânico pode ser empregado para aproveitar diversas fontes de energia já bem definidas. Se as características do ciclo são respeitadas a geração de potência será possível em qualquer uma destas formas. Portanto, o ciclo Rankine orgânico é flexível, para muitas aplicações.

##### **1.4.4.1**

###### **Recuperação de calor de rejeito**

Em qualquer indústria que utilize energia térmica para seus processos haverá um rejeito de calor que normalmente é enviado ao ambiente externo. Não existe ciclo termodinâmico algum que não rejeite energia para uma fonte de menor temperatura, isto como consequência da segunda lei da Termodinâmica. Este rejeito de calor, não aproveitado, gera a chamada contaminação térmica, especialmente em fontes de água (rios, mares, lagos, etc.) de onde algumas usinas térmicas e outras indústrias pegam o líquido para resfriamento. Ademais, este calor rejeitado tem um potencial energético que simplesmente é desperdiçado, às vezes em unidades de energia enormes.

O ciclo Rankine orgânico é uma opção para aproveitar este calor rejeitado e gerar ainda mais energia útil para a mesma indústria ou outras aplicações. Os fluxos de calor de rejeito da atividade primária teriam que passar por um trocador de calor para serem transferidos até o fluido de trabalho orgânico. Esta alternativa também é interessante desde o ponto de vista de que a geração de energia adicional não implica o consumo adicional de combustíveis, portanto, reduzindo a emissão de CO<sub>2</sub> e gerando economia para o setor.

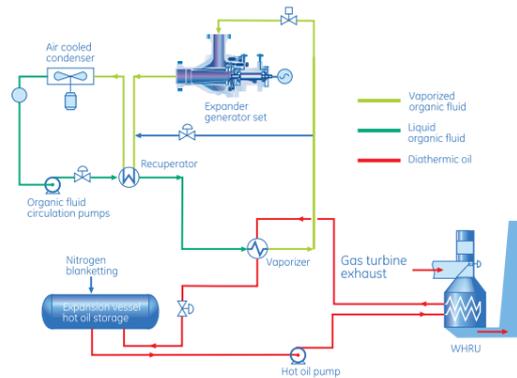


Figura 1.16 – Esquema de recuperação de calor implementado pela GE [8]

#### 1.4.4.2

##### Aproveitamento de energia geotérmica

A energia geotérmica é aquela que se encontra no interior da superfície terrestre em forma de calor, é gerada a partir das atividades das formações do subsolo e armazenada nesse ambiente. Pode ser aproveitada pela extração de fontes de água a elevadas temperaturas, presentes a determinadas profundidades. Quando estas águas estão em níveis de temperaturas considerados altos (150-400 °C), parte do fluido extraído sai como vapor e pode movimentar diretamente uma turbina para gerar potência. Em níveis de temperatura menor, o vapor pode-se aproveitar diretamente.

Dadas as temperaturas que têm as fontes geotérmicas, a aplicação do ciclo Rankine orgânico é uma alternativa válida e já usada na construção de plantas geotérmicas. Dependendo do fluido de trabalho utilizado é possível utilizar fontes de temperatura tão baixas quanto 57°C [9].

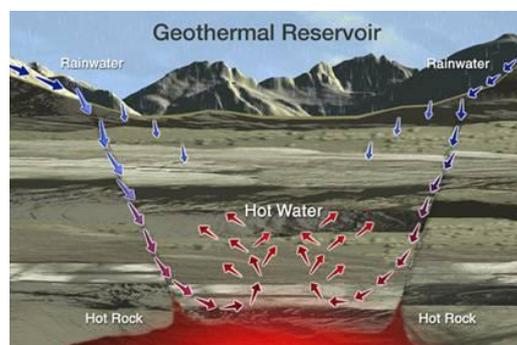


Figura 1.17 – Reservatório geotérmico [10]

### 1.4.4.3

#### Biomassa

Outra fonte energética possível para o funcionamento do ciclo Rankine orgânico é a biomassa. A biomassa é toda aquela matéria biológica que pode ser utilizada como energia. Existem diferentes tipos de biomassa e possíveis formas de aproveitamento dela. Com o ciclo Rankine orgânico, a combustão da biomassa é a maneira mais comum para gerar energia desta fonte. O calor que ingressa no ciclo é gerado a través da queima de matéria orgânica, principalmente, bagaço de plantas usadas na agricultura ou lenha.

A forma de implantação mais utilizada é a combustão em uma caldeira ou forno convencional. O calor gerado é transferido para o fluido de trabalho do ciclo Rankine orgânico mediante um trocador de calor. A energia residual dos gases de escape do forno ou caldeira pode ser re-aproveitada para aquecimento de água, etc.

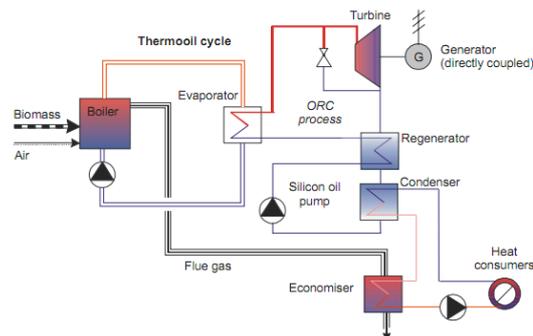


Figura 1.18 – Geração de energia com biomassa [11]

### 1.4.5

#### O ciclo Rankine orgânico com energia solar

A aplicação do ciclo Rankine orgânico com energia solar é uma interessante opção de aproveitamento dessa fonte deste recurso renovável. Neste caso, a entrada de calor no ciclo viria a partir da radiação solar que ingressa na superfície terrestre. Para conseguir esta entrada de calor o ciclo precisa de equipamentos que capturem esta energia e a transfiram até o fluido de trabalho, para depois efetuar-se o processo seguinte de expansão.

Os coletores solares são dispositivos conhecidos por captar a energia solar incidente. A questão é se estes coletores vão ser inclusos dentro do equipamento do ciclo ou se haverá outro mecanismo para levar este calor adquirido para o fluido de trabalho. Com base neste critério, pode-se classificar os ciclos Rankine orgânicos com energia solar em:

- Com entrada direta de calor: neste caso, os coletores solares formariam parte direta do equipamento do ciclo. Depois da elevação de pressão, o fluido passaria diretamente pelos coletores, ganharia o calor necessário e sairia deles para o expensor ou turbina.

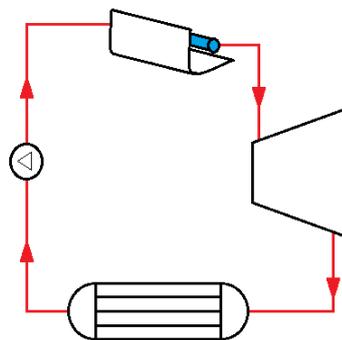


Figura 1.19 – Ciclo Rankine orgânico solar com entrada direta de calor

- Com trocador de calor: nesta situação, os coletores não são parte do equipamento do ciclo. O fluido de trabalho depois da elevação da pressão passa por um trocador que, a sua vez, transfere o calor de outro fluido que foi aquecido nos coletores. Os fluidos não experimentam nenhuma mistura e só trocam calor. Como se entende, haveria um circuito principal, o do fluido de trabalho do ciclo, e um circuito secundário, do fluido que circula pelos coletores.

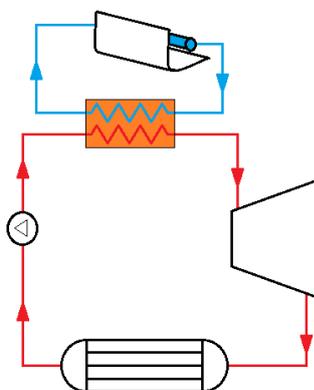


Figura 1.20 – Ciclo Rankine orgânico solar com trocador de calor

O ciclo com entrada de calor direta a partir dos coletores é termodinamicamente mais adequado. Isto porque um ingresso de calor com mais equipamentos como trocadores de calor aumenta as irreversibilidades do sistema. Estas irreversibilidades fazem que nem todo o calor capturado nos coletores chegue ao ciclo.

Agora, o problema de um ciclo com entrada direta é que os coletores solares e seus acessórios normalmente não são desenhados para suportar as altas pressões que devem alcançar um ciclo Rankine. Também o controle dos transientes de radiação solar diretamente na geração e o manejo de duas fases de fluido nos coletores são desafios consideráveis. Atualmente, existe certo desenvolvimento a nível experimental da geração direta, mas, para ciclos Rankine convencionais (com água). Um exemplo importante é o centro de pesquisa “Plataforma Solar de Almería” na Espanha.



Figura 1.21 – Usina de geração solar direta Rankine [12]

Os ciclos Rankine orgânicos na atualidade constituem uma solução para a geração de potências menores (inferiores a 100 kW), em regiões onde o recurso solar é abundante e o acesso às redes elétricas é complicado. Algumas das vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de ciclos em projetos de baixas potências são:

- Não se precisam de temperaturas tão elevadas nos coletores solares, portanto, menores perdas térmicas.
- O volume e custo dos equipamentos são muito menores aos de um projeto de maior capacidade.
- As eficiências podem ser menores que as de um projeto de grande porte.

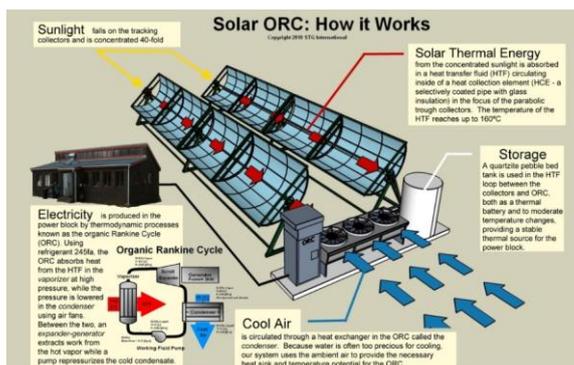


Figura 1.22 – Ciclo Rankine orgânico solar comercial de baixa potência [13]

## 1.5

### ARMAZENAMENTO TÉRMICO

Devido a que a radiação solar é um recurso energético cuja incidência é inconstante e imprevisível, mesmo em condições geográficas, de tempo e históricas conhecidas, não existe a certeza de se conseguir produzir a conversão energética desejada, mesmo nas melhores horas do dia. Em efeito, fenômenos meteorológicos, a dissipação da atmosfera e outros acontecimentos podem reduzir ou até eliminar totalmente a radiação solar incidente nos coletores de uma usina solar. Durante as horas de escuridão, uma usina deste tipo não poderia produzir potência devido à ausência total de luz, ficando inútil durante estes períodos de tempo que se repetem a cada dia.

Por este motivo, tem-se implementado sistemas que armazenam parte da energia fornecida pelo Sol durante as horas de radiação solar para depois aproveitar esta energia armazenada quando não exista radiação solar disponível. Estes sistemas têm que ser o suficientemente confiáveis para armazenar esta energia durante um período de tempo razoável, segundo as necessidades de funcionamento da usina. Ademais, devem permitir o funcionamento pleno da usina nos períodos sem radiação solar durante algumas horas contínuas.

A utilização de sistemas de armazenamento nas usinas de geração por coletores solares apresenta uma grande vantagem para o funcionamento das mesmas e eleva sua capacidade operativa. Mas, a implementação deste tipo de sistemas aumenta o grau de complexidade no desenho, devido à necessidade de outros equipamentos, como tanques de armazenamento, trocadores de calor,

bombas, tubulações, etc. Esta complexidade dependerá de que tipo de sistema seja instalado e os parâmetros operacionais buscados.

### 1.5.1

#### Tipos de armazenamento térmico

Existem algumas soluções para armazenar termicamente a energia absorvida da radiação solar. Algumas formas têm evoluído a partir das inovações tecnológicas. Dependendo do tipo de armazenamento são empregadas distintas substâncias e equipamentos adicionais ao sistema.

#### 1.5.1.1

##### Armazenamento direto com dois tanques

Este armazenamento utiliza diretamente o fluido térmico que circula pelos coletores solares. O fluxo que sai dos coletores solares vai diretamente a um tanque onde se armazena este fluido quente. Este líquido é despachado para o trocador de calor com o ciclo Rankine, conforme a demanda energética. Uma vez resfriado vai até um tanque de fluido frio. Do tanque do fluido frio passa de novo pelos coletores solares sempre que exista presença solar.

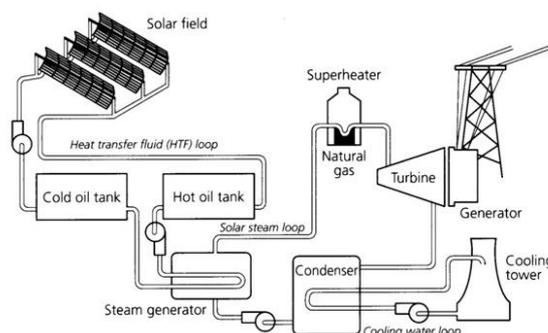


Figura 1.23 – Armazenamento direto com dois tanques [14]

Este sistema foi empregado na usina SEGS, na Califórnia, permitindo até 3 horas de funcionamento adicional às horas de Sol. Mas, como empregava fluidos térmicos, com o aumento da temperatura de aquecimento nos coletores, surgiu a necessidade de se utilizar tanques pressurizados, o que encarece

economicamente os projetos e dificulta o aspecto técnico para implementar este tipo de sistema.

### 1.5.1.2

#### Armazenamento indireto com dois tanques

O termo indireto se refere ao fato que nos tanques de armazenamento não se acumula contem o fluido que circula pelos coletores solares. O fluido térmico que sai dos coletores solares é enviado em parte ao gerador de vapor do ciclo Rankine, enquanto outra parte do fluxo é enviada a um trocador de calor que permite o ganho de calor nos tanques de armazenamento. Para que este ganho de calor seja possível, o fluido de armazenamento tem que circular de um chamado tanque frio até outro reservatório chamado tanque quente, passando pelo trocador de calor. Os dois tanques são isolados. Quando se precisa da energia armazenada, se inverte o sentido de circulação, ou seja, do tanque quente ao frio para que desta vez, no trocador de calor o fluido térmico ganhe energia.

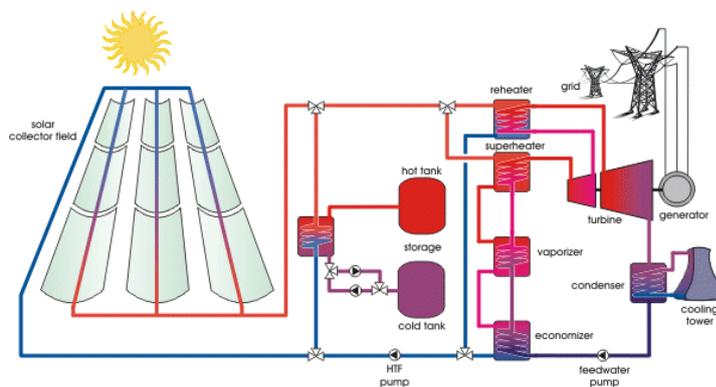


Figura 1.24 – Armazenamento indireto com dois tanques [15]

Este sistema atualmente é muito empregado e é dos mais promissoras no desenvolvimento da tecnologia. Geralmente, é utilizado sal fundido nos tanques de armazenamento, por sua alta capacidade de aumento de temperatura sem se vaporizar. O isolante poder ser concreto, embora, existam estudos que empreguem outros materiais com baixa condutividade térmica.

### 1.5.1.3

#### Armazenamento direto com um tanque simples com efeito termoclina

É também um armazenamento direto de fluido térmico, só que utilizando um só tanque. Neste tanque o fluido mais quente estará na parte de cima e o fluido mais frio na parte de baixo. Entre os dois existirá uma zona de mistura chamada de termoclina. Uma vantagem deste método é que parte do fluido que enche o tanque pode ser substituída por material de recheio de baixo custo. O importante é que a zona de termoclina não chegue a se dispersar no tanque misturando os fluidos a diferentes temperaturas.

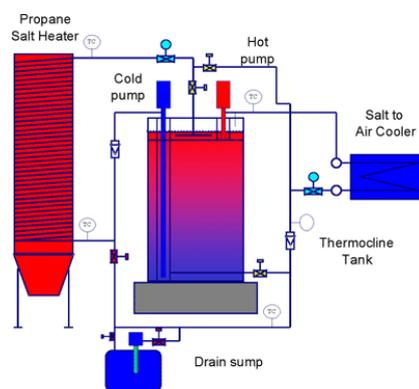


Figura 1.25 – Tanque de armazenamento direto com efeito termoclina [16]

### 1.5.1.4

#### Utilização de sal fundido como fluido térmico nos coletores solares

Este método faz que o armazenador de calor, neste caso sal fundido, circule diretamente pelos coletores de calor. Elimina-se a necessidade de ter um trocador entre o fluido térmico o fluido que circula pelos tanques. Ao se aquecer o sal fundido na saída dos coletores vai até o tanque quente e de lá é despachado para o gerador de vapor. O sal fundido mais frio, que sai do gerador de vapor vai até o tanque frio e depois circula de novo pelos coletores. No lugar de coletores solares também se pode aproveitar a tecnologia da torre solar concentradora.

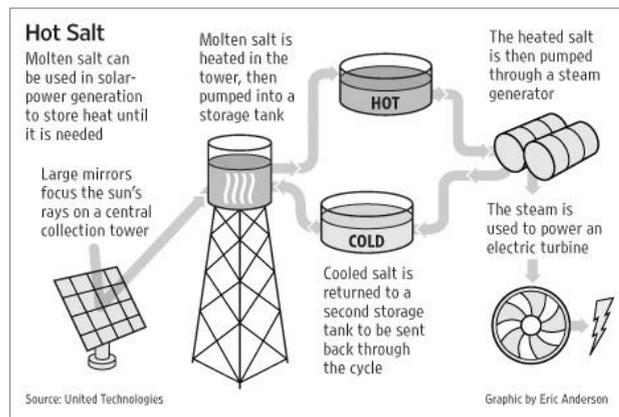


Figura 1.26 – Aquecimento de sal fundido numa torre solar [17]

Este método é muito interessante e traz algumas vantagens. Elimina-se o trocador de calor, não se precisa dos fluidos térmicos convencionais e permite alcançar maiores temperaturas no sal fundido. O problema principal é que se o sal chega a uma determinada temperatura baixa este se solidifica. Isto pode acontecer nas noites ou quando a usina esteja parada. Porém, existem novas misturas de sal que têm um ponto de solidificação cada vez menor, o que torna os projetos mais viáveis.