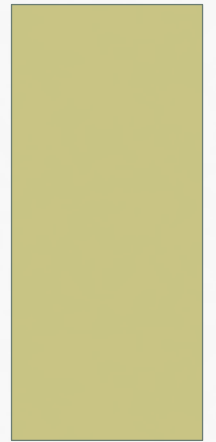


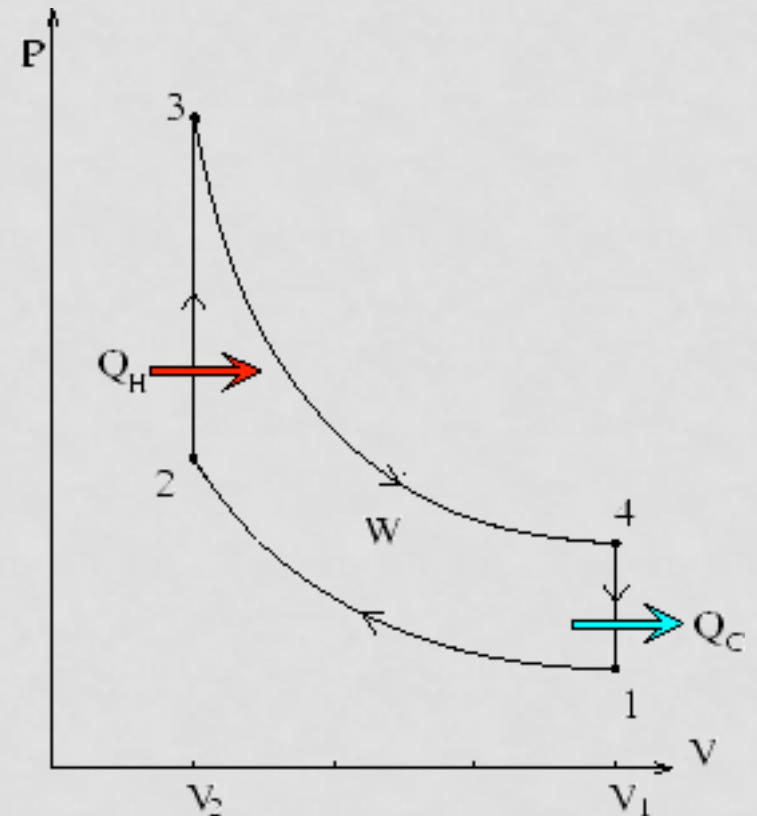
TERMODINÂMICA

2ª LEI DA TERMODINÂMICA



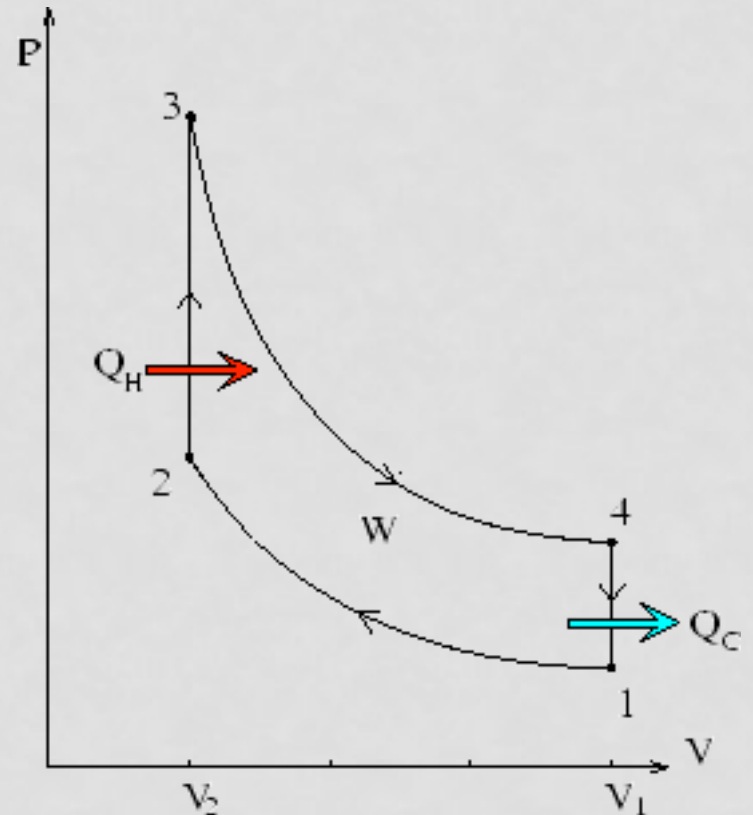
MÁQUINAS TÉRMICAS

- Na aula passada vimos que podemos usar ciclos termodinâmicos para construir máquinas térmicas:



MÁQUINAS TÉRMICAS

- Na aula passada vimos que podemos usar ciclos termodinâmicos para construir máquinas térmicas:
 - Fornecemos um calor Q_H para o gás e ele realiza um trabalho W .

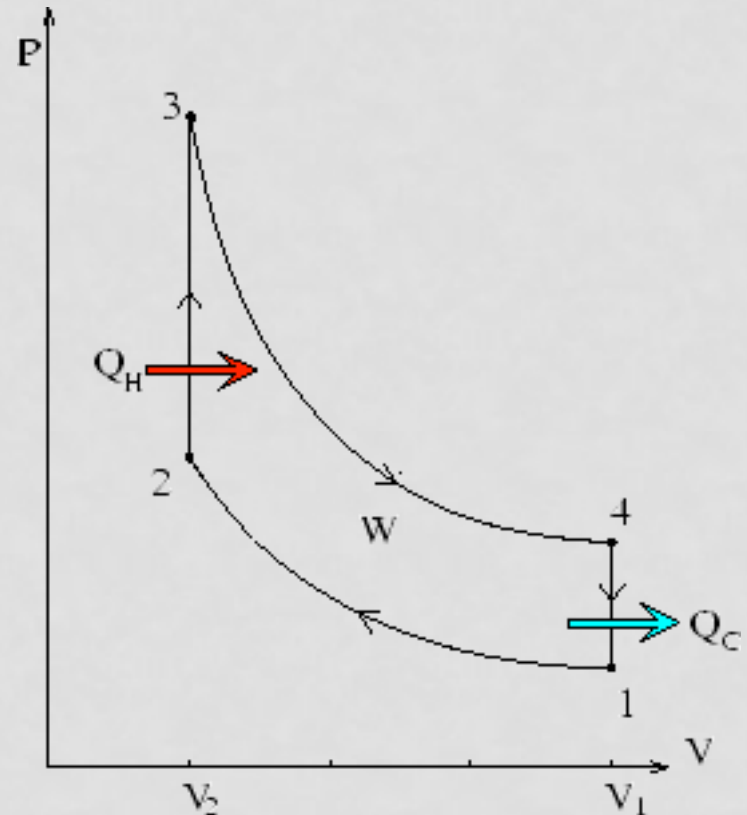


MÁQUINAS TÉRMICAS

- Na aula passada vimos que podemos usar ciclos termodinâmicos para construir máquinas térmicas:
 - Fornecemos um calor Q_R para o gás e ele realiza um trabalho W .
- Definimos

$$\eta = \frac{W}{Q_R} = 1 - \frac{Q_P}{Q_R}$$

como sendo a eficiência da máquina.



MÁQUINAS TÉRMICAS

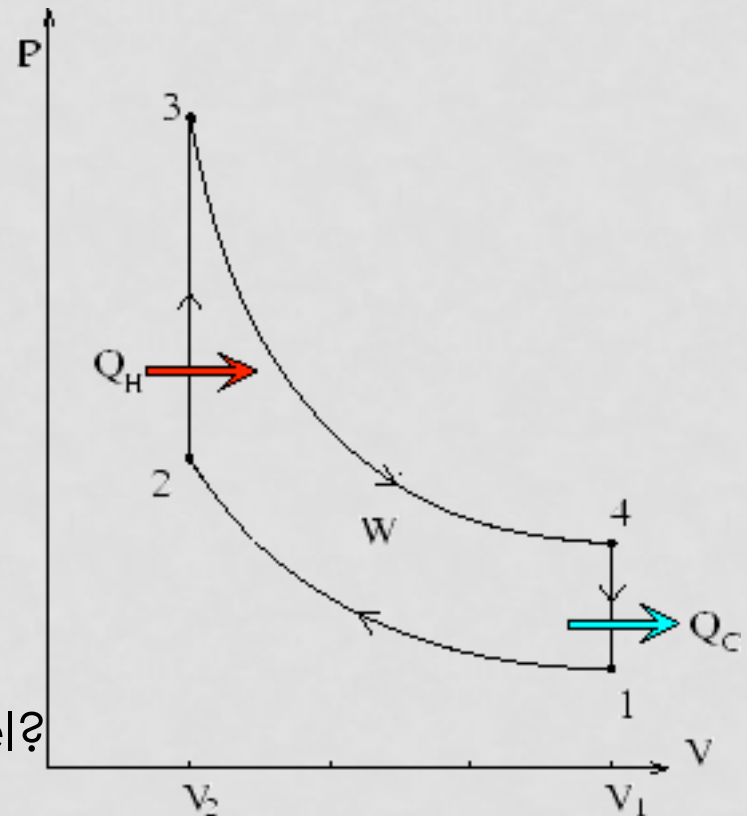
- Na aula passada vimos que podemos usar ciclos termodinâmicos para construir máquinas térmicas:
 - Fornecemos um calor Q_R para o gás e ele realiza um trabalho W .

- Definimos

$$\eta = \frac{W}{Q_R} = 1 - \frac{Q_P}{Q_R}$$

como sendo a eficiência da máquina.

- Podemos nos perguntar:
 - Qual a máxima eficiência possível?



2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - $\eta < 1!$

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - $\eta < 1!$
 - É impossível termos moto perpétuo do 2º tipo (i.e. $\eta = 1$)

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - $\eta < 1!$
 - É impossível termos moto perpétuo do 2º tipo (i.e. $\eta = 1$)
- Considere uma expansão isotérmica.

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - $\eta < 1!$
 - É impossível termos moto perpétuo do 2º tipo (i.e. $\eta = 1$)
- Considere uma expansão isotérmica.
 - $W = Q$. Por que isto não viola a 2ª lei da termodinâmica?

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

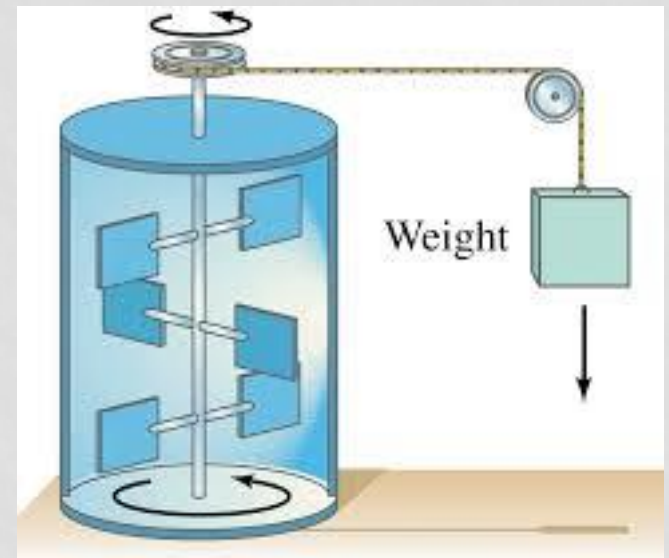
- **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - $\eta < 1!$
 - É impossível termos moto perpétuo do 2º tipo (i.e. $\eta = 1$)
- Considere uma expansão isotérmica.
 - $W = Q$. Por que isto não viola a 2ª lei da termodinâmica?
 - Não é o **único efeito!** No fim do processo o gás não ocupa o mesmo volume.

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **SETA DO TEMPO:** A 2ª lei implica na existência de seta do tempo. Certos eventos são irreversíveis!

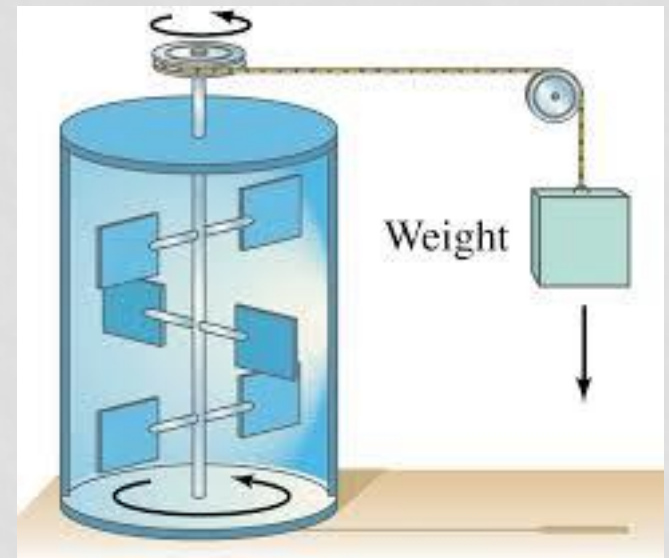
2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **SETA DO TEMPO:** A 2ª lei implica na existência de seta do tempo. Certos eventos são irreversíveis!
 - **Exemplo:** Vimos na aula 5 que a experiência de Joule. Com a queda do peso, as pás giram. Ao pararem por atrito aquecem a água.



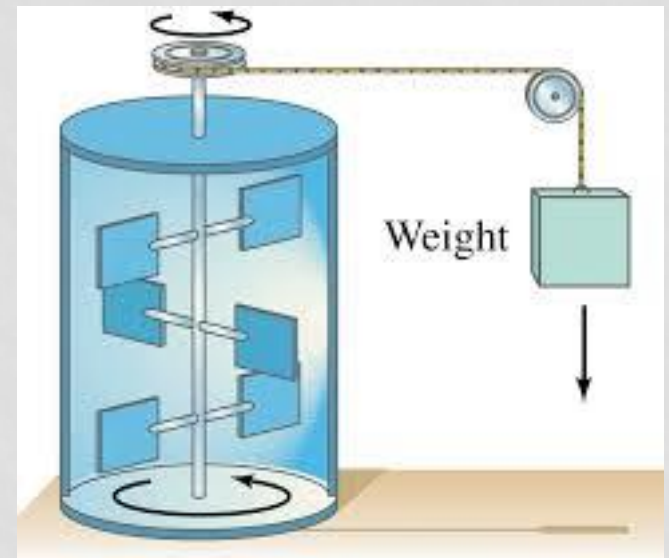
2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **SETA DO TEMPO:** A 2ª lei implica na existência de seta do tempo. Certos eventos são irreversíveis!
 - **Exemplo:** Vimos na aula 5 que a experiência de Joule. Com a queda do peso, as pás giram. Ao pararem por atrito aquecem a água.
 - **Processo inverso:** A água esfria, e a energia liberada seria usada para girar as pás e levantar de volta bloco.
- A 2ª lei (e o bom senso) exigem que o processo inverso **não** aconteça!



2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **SETA DO TEMPO:** A 2ª lei implica na existência de seta do tempo. Certos eventos são irreversíveis!
 - **Exemplo:** Vimos na aula 5 que a experiência de Joule. Com a queda do peso, as pás giram. Ao pararem por atrito aquecem a água.
 - **Processo inverso:** A água esfria, e a energia liberada seria usada para girar as pás e levantar de volta bloco.
- A 2ª lei (e o bom senso) exigem que o processo inverso **não** aconteça!

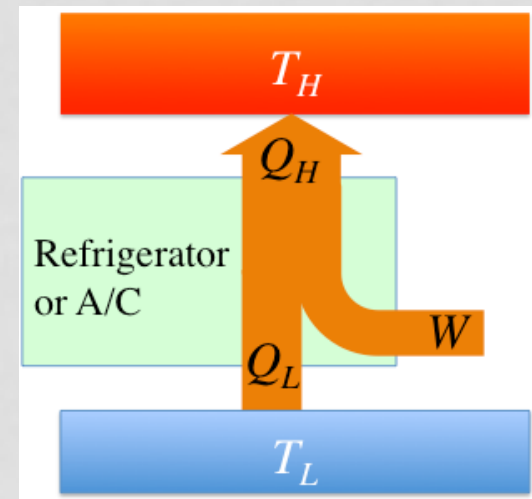


REFRIGERADORES

- Até agora, discutimos extensamente máquinas térmicas.

REFRIGERADORES

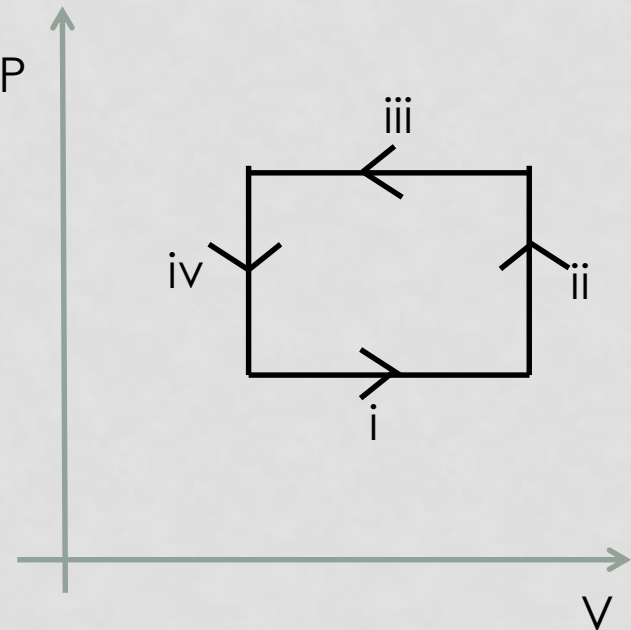
- Até agora, discutimos extensamente máquinas térmicas.
- Em vez de fornecermos **calor** a um gás para que ele realize **trabalho**, podemos realizar **trabalho** sobre o gás para que ele retire **calor** de uma fonte fria e a transfira para a fonte quente!



REFRIGERADORES

- Refrigeradores são representados em um diagrama de $P \times V$ por ciclos no sentido **anti-horário**!
 - $W < 0$. (Em um refrigerador, trabalho é realizado **sobre** o gás!)
 - Exemplifiquemos em um exemplo simples.
 - Calor retirado da fonte fria (recebido pelo gás):

$$Q_2 := Q_i + Q_{ii} \quad P$$



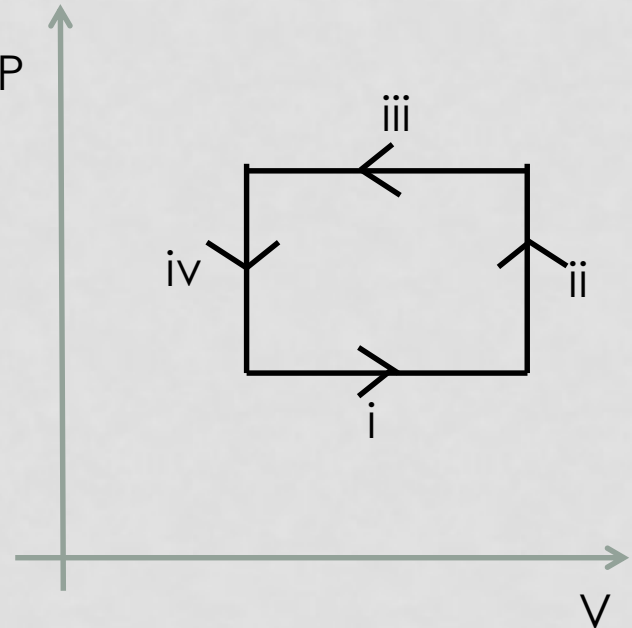
REFRIGERADORES

- Refrigeradores são representados em um diagrama de $P \times V$ por ciclos no sentido **anti-horário**!
 - $W < 0$. (Em um refrigerador, trabalho é realizado **sobre** o gás!)
 - Exemplifiquemos em um exemplo simples.
 - Calor retirado da fonte fria (recebido pelo gás):

$$Q_2 := Q_i + Q_{ii} \quad P$$

- Calor dado à fonte quente:

$$Q_1 := -Q_{iii} - Q_{iv}$$



REFRIGERADORES

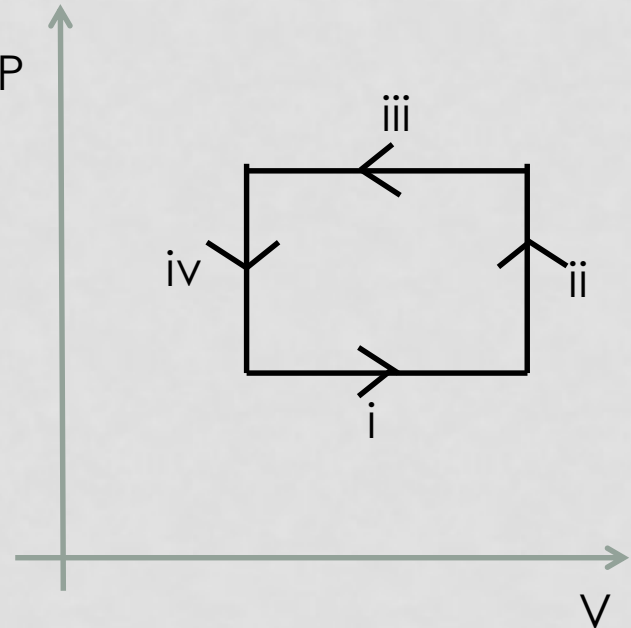
- Refrigeradores são representados em um diagrama de $P \times V$ por ciclos no sentido **anti-horário**!
 - $W < 0$. (Em um refrigerador, trabalho é realizado **sobre** o gás!)
 - Exemplifiquemos em um exemplo simples.
 - Calor retirado da fonte fria (recebido pelo gás):

$$Q_2 := Q_i + Q_{ii} \quad P$$

- Calor dado à fonte quente:

$$Q_1 := -Q_{iii} - Q_{iv}$$

- Note que $Q_1, Q_2 > 0$.



REFRIGERADORES

- Refrigeradores são representados em um diagrama de $P \times V$ por ciclos no sentido **anti-horário**!
 - $W < 0$. (Em um refrigerador, trabalho é realizado **sobre** o gás!)
 - Exemplifiquemos em um exemplo simples.
 - Calor retirado da fonte fria (recebido pelo gás):

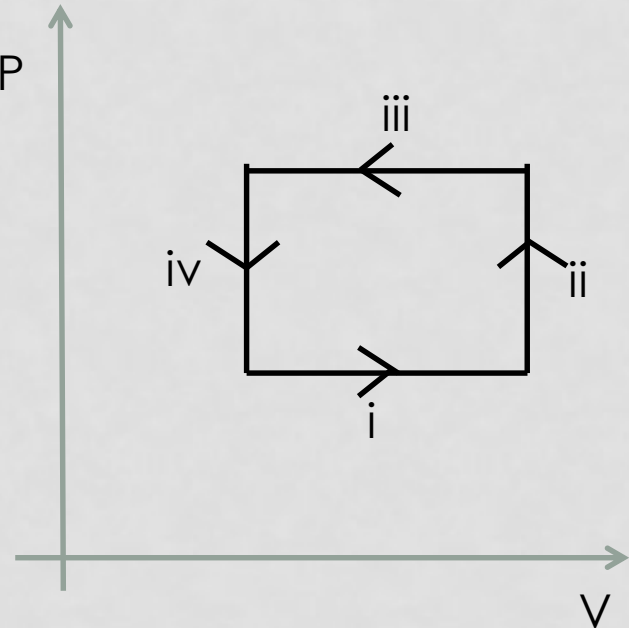
$$Q_2 := Q_i + Q_{ii} \quad P$$

- Calor dado à fonte quente:

$$Q_1 := -Q_{iii} - Q_{iv}$$

- Note que $Q_1, Q_2 > 0$.
- Pela 1ª lei:

$$Q_2 + |W| = Q_1$$



REFRIGERADORES

- Em outras palavras:
 - Um refrigerador retira calor Q_2 da fonte fria (ex. geladeira), e transfere um calor Q_1 para a fonte quente (ex. ar). Para tanto devemos realizar um trabalho W sobre o gás, tal que

$$Q_2 + |W| = Q_1$$

REFRIGERADORES

- Em outras palavras:
 - Um refrigerador retira calor Q_2 da fonte fria (ex. geladeira), e transfere um calor Q_1 para a fonte quente (ex. ar). Para tanto devemos realizar um trabalho W sobre o gás, tal que

$$Q_2 + |W| = Q_1$$

- Fator de qualidade (ou coeficiente de desempenho):

$$K := \frac{Q_2}{W}$$

REFRIGERADORES

- Em outras palavras:
 - Um refrigerador retira calor Q_2 da fonte fria (ex. geladeira), e transfere um calor Q_1 para a fonte quente (ex. ar). Para tanto devemos realizar um trabalho W sobre o gás, tal que

$$Q_2 + |W| = Q_1$$

- Fator de qualidade (ou coeficiente de desempenho):

$$K := \frac{Q_2}{W}$$

- Qual o maior K que podemos obter?

REFRIGERADORES

- Em outras palavras:
 - Um refrigerador retira calor Q_2 da fonte fria (ex. geladeira), e transfere um calor Q_1 para a fonte quente (ex. ar). Para tanto devemos realizar um trabalho W sobre o gás, tal que

$$Q_2 + |W| = Q_1$$

- Fator de qualidade (ou coeficiente de desempenho):

$$K := \frac{Q_2}{W}$$

- Qual o maior K que podemos obter?

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
 - K é finito!

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
 - K é finito!
 - Necessariamente precisamos realizar trabalho para transferirmos calor de uma fonte fria para uma quente!

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
 - K é finito!
 - Necessariamente precisamos realizar trabalho para transferirmos calor de uma fonte fria para uma quente!
 - Não existe refrigerador ideal!

2ª LEI DA TERMODINÂMICA

- **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
 - K é finito!
 - Necessariamente precisamos realizar trabalho para transferirmos calor de uma fonte fria para uma quente!
 - Não existe refrigerador ideal!
- Mostremos, agora, que as duas formulações da 2ª lei da termodinâmica se equivalem.

EQUIVALÊNCIA: I) $K \Rightarrow C$

- Relembrando:
 - **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- Mostremos que $K \Rightarrow C$.

$$K \Rightarrow C$$

- Relembrando:
 - **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- Mostremos que $K \Rightarrow C$.
 - Para tanto, suponha K válido mas C falso, i.e., suponha que exista um refrigerador miraculoso.

$$K \Rightarrow C$$

- Relembrando:
 - **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- Mostremos que $K \Rightarrow C$.
 - Para tanto, suponha K válido mas C falso, i.e., suponha que exista um refrigerador miraculoso.
 - Mostremos que isto implica na possibilidade de construir um moto perpétuo da 2ª espécie.

$$K \Rightarrow C$$

- Uma máquina térmica retira Q_1 da fonte quente, realiza trabalho W e deposita $Q_2 < Q_1$ na fonte fria.

$$K \Rightarrow C$$

- Uma máquina térmica retira Q_1 da fonte quente, realiza trabalho W e deposita $Q_2 < Q_1$ na fonte fria.
- Usemos um refrigerador ideal operando entre a mesma fonte quente e a mesma fria, para devolver Q_2 à fonte quente.

$$K \Rightarrow C$$

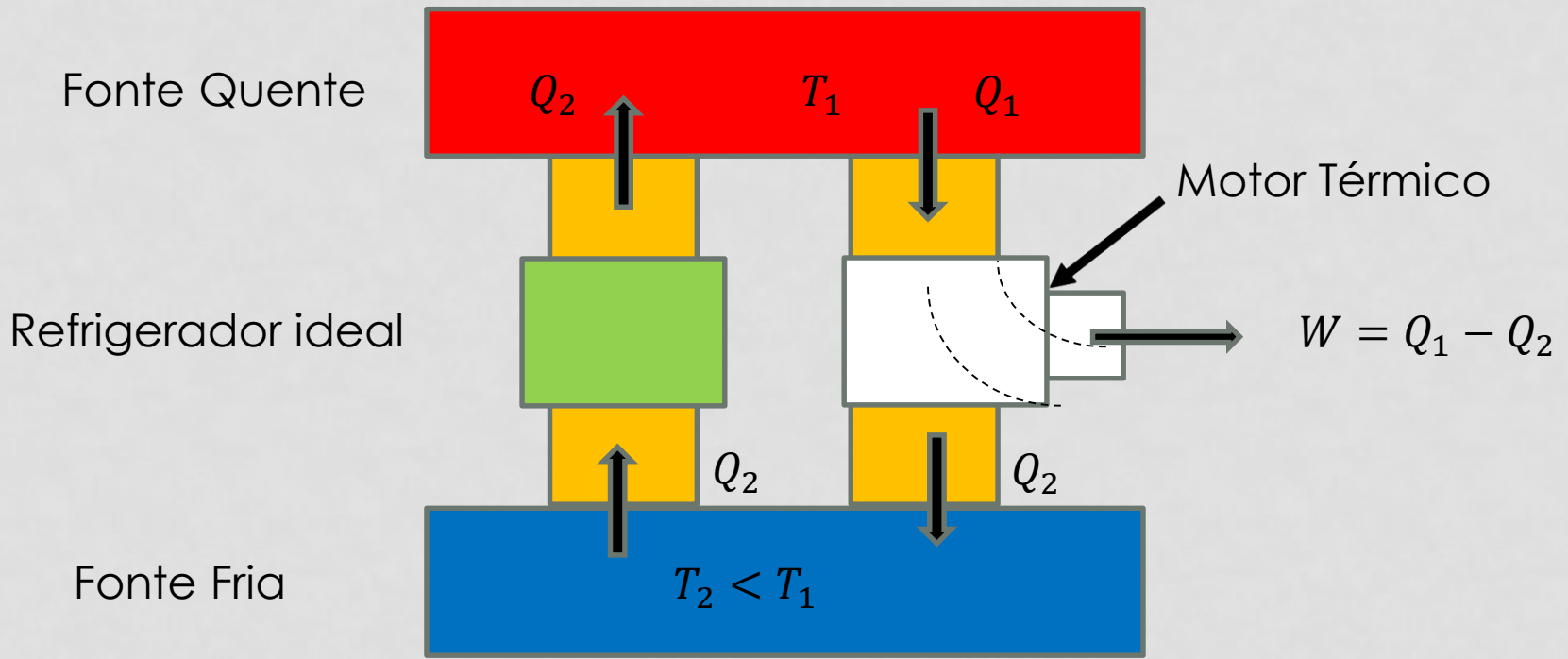
- Uma máquina térmica retira Q_1 da fonte quente, realiza trabalho W e deposita $Q_2 < Q_1$ na fonte fria.
- Usemos um refrigerador ideal operando entre a mesma fonte quente e a mesma fria, para devolver Q_2 à fonte quente.
- Estas duas máquinas operando conjuntamente teriam o **único** efeito de retirar $Q_2 - Q_1$ da fonte quente e realizar trabalho W , violando o enunciado de Kelvin.

$$K \Rightarrow C$$

- Uma máquina térmica retira Q_1 da fonte quente, realiza trabalho W e deposita $Q_2 < Q_1$ na fonte fria.
- Usemos um refrigerador ideal operando entre a mesma fonte quente e a mesma fria, para devolver Q_2 à fonte quente.
- Estas duas máquinas operando conjuntamente teriam o **único** efeito de retirar $Q_2 - Q_1$ da fonte quente e realizar trabalho W , violando o enunciado de Kelvin.
- Logo, se o enunciado de Kelvin é válido, o de Clausius também o deve ser!!

$$K \Rightarrow C$$

Esta discussão pode ser ilustrada por um diagrama:



$$C \Rightarrow K$$

- Relembrando:
 - **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- Mostremos que $C \Rightarrow K$.
 - Para tanto, suponha C válido mas K falso, i.e., suponha que exista um moto perpétuo da 2ª espécie.

$$C \Rightarrow K$$

- Relembrando:
 - **ENUNCIADO DE KELVIN:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja remover calor de um reservatório térmico e realizar uma quantidade equivalente de calor.
 - **ENUNCIADO DE CLAUSIUS:** É impossível realizar um processo no qual o **único efeito** seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente.
- Mostremos que $C \Rightarrow K$.
 - Para tanto, suponha C válido mas K falso, i.e., suponha que exista um moto perpétuo da 2ª espécie.
 - Mostremos que isto implica na possibilidade de construirmos um refrigerador perfeito.

$$C \Rightarrow K$$

- Um refrigerador absorve calor Q_2 da fonte fria, cedendo calor Q_1 à fonte quente. Para tanto, trabalho $W=Q_1-Q_2$ deve ser realizado sobre o gás.

$$C \Rightarrow K$$

- Um refrigerador absorve calor Q_2 da fonte fria, cedendo calor Q_1 à fonte quente. Para tanto, trabalho $W=Q_1-Q_2$ deve ser realizado sobre o gás.
- Utilize o moto perpétuo da 2ª espécie para retirarmos Q_1-Q_2 da fonte quente e transformarmos este calor totalmente em trabalho.

$$C \Rightarrow K$$

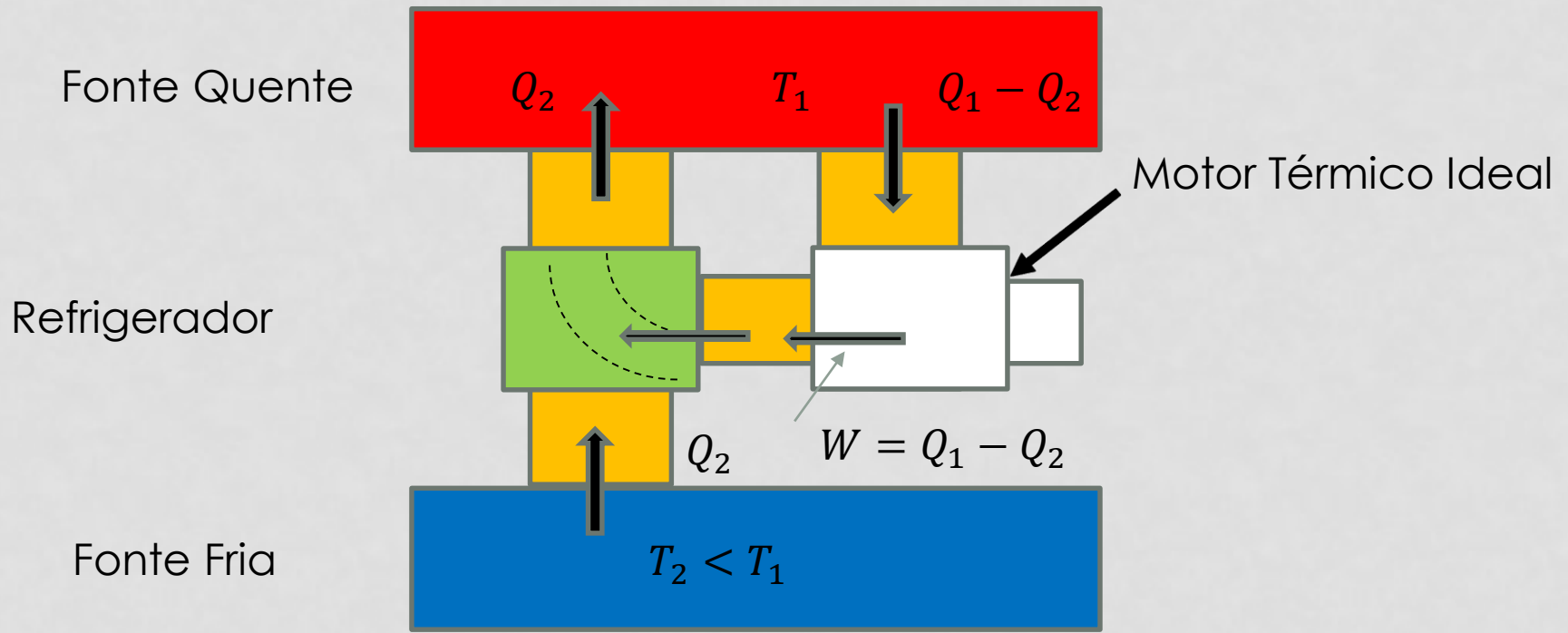
- Um refrigerador absorve calor Q_2 da fonte fria, cedendo calor Q_1 à fonte quente. Para tanto, trabalho $W=Q_1-Q_2$ deve ser realizado sobre o gás.
- Utilize o moto perpétuo da 2ª espécie para retirarmos Q_1-Q_2 da fonte quente e transformarmos este calor totalmente em trabalho.
- Estas duas máquinas operando juntas formam um refrigerador perfeito, cujo único efeito seria a transferência de Q_2 da fonte fria para a fonte quente!

$$C \Rightarrow K$$

- Um refrigerador absorve calor Q_2 da fonte fria, cedendo calor Q_1 à fonte quente. Para tanto, trabalho $W=Q_1-Q_2$ deve ser realizado sobre o gás.
- Utilize o moto perpétuo da 2ª espécie para retirarmos Q_1-Q_2 da fonte quente e transformarmos este calor totalmente em trabalho.
- Estas duas máquinas operando juntas formam um refrigerador perfeito, cujo único efeito seria a transferência de Q_2 da fonte fria para a fonte quente!
- Este esquema pode ser ilustrado em um diagrama:

$$C \Rightarrow K$$

- Esta discussão pode ser ilustrada por um diagrama:



CICLO DE CARNOT

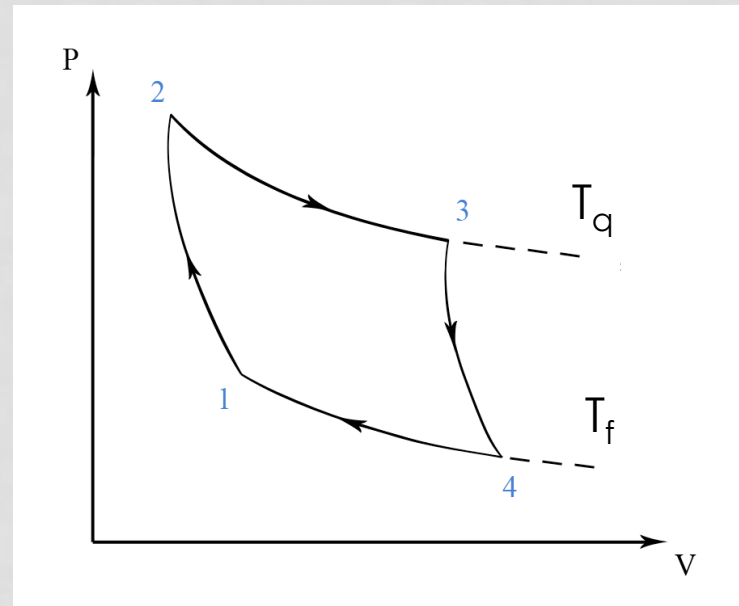
- Uma vez que jamais podemos ter $\eta=1$, podemos perguntar qual a máxima eficiência possível.

CICLO DE CARNOT

- Uma vez que jamais podemos ter $\eta=1$, podemos perguntar qual a máxima eficiência possível.
 - Considere uma máquina operando entre uma fonte fria à temperatura T_f e uma fonte quente à temperatura T_q .

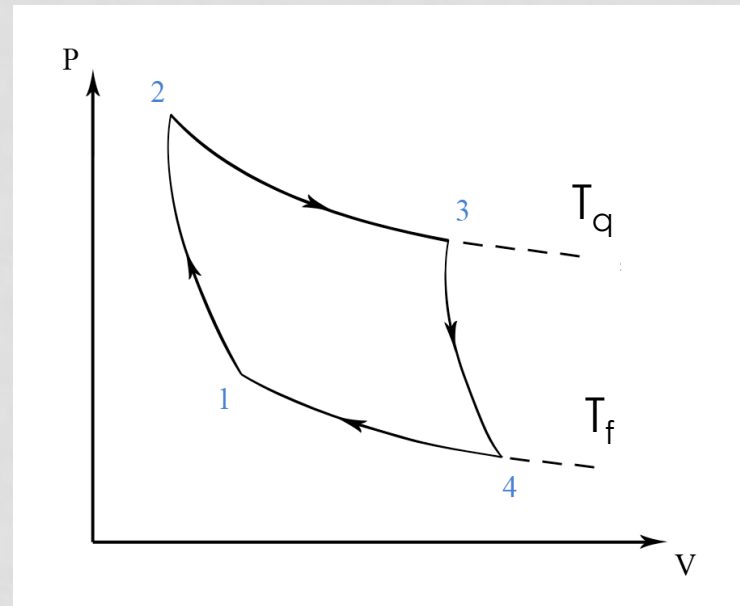
CICLO DE CARNOT

- Uma vez que jamais podemos ter $\eta=1$, podemos perguntar qual a máxima eficiência possível.
 - Considere uma máquina operando entre uma fonte fria à temperatura T_f e uma fonte quente à temperatura T_q .
- Mostraremos que a maior eficiência possível é obtida pelo ciclo de Carnot.
 - 1- \rightarrow 2 e 3- \rightarrow 4: adiabáticas.
 - 2- \rightarrow 3 e 4- \rightarrow 1: isotermas.



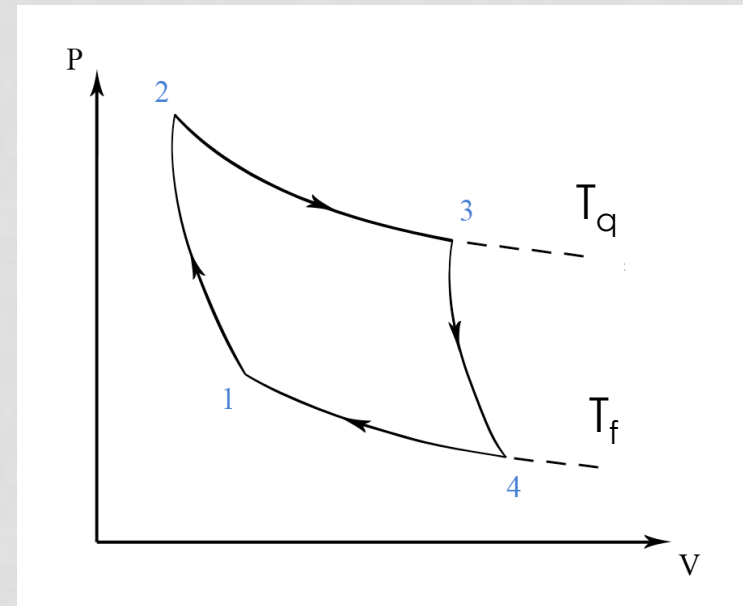
CICLO DE CARNOT

- Note que o ciclo de Carnot é reversível.



CICLO DE CARNOT

- Note que o ciclo de Carnot é reversível.
- Mostraremos que dentre todas as máquinas operando entre T_f e T_q a de Carnot é a que possui a maior eficiência.

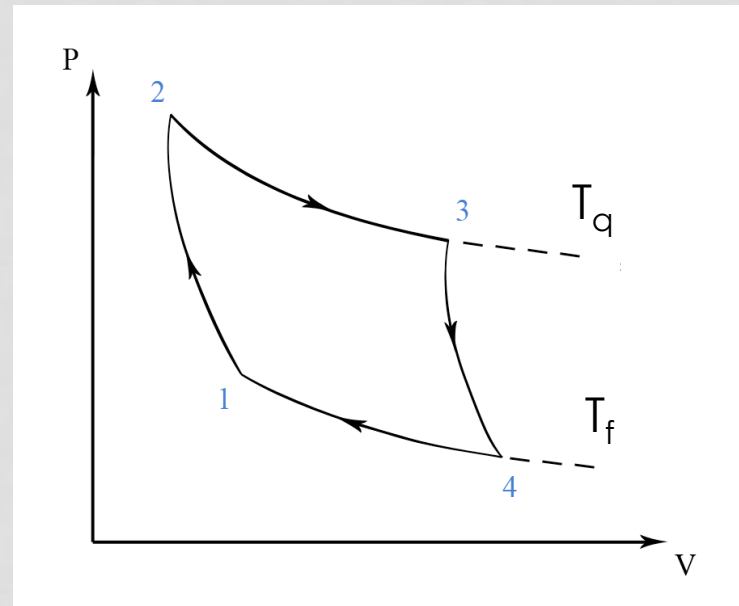


CICLO DE CARNOT

- Note que o ciclo de Carnot é reversível.
- Mostraremos que dentre todas as máquinas operando entre T_f e T_q a de Carnot é a que possui a maior eficiência.
- Temos:

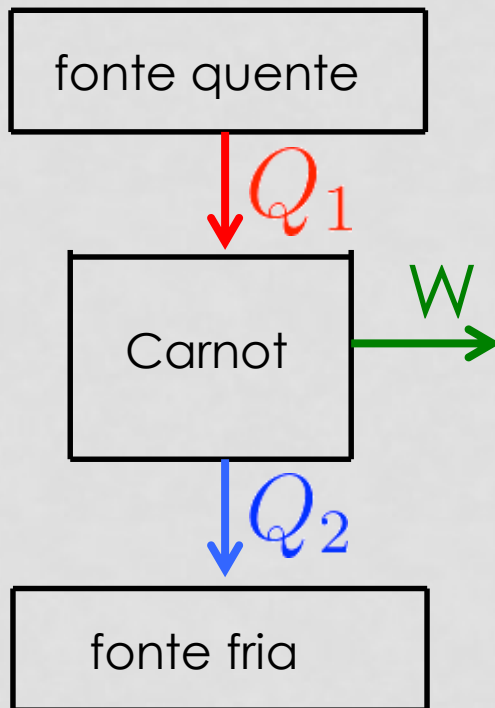
$$\eta_C = \frac{W}{Q_1}$$

$$W + Q_2 = Q_1$$



CICLO DE CARNOT

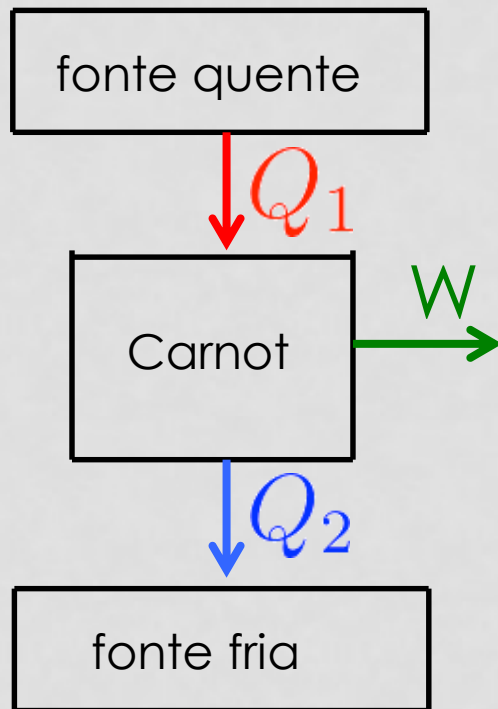
- Esquemáticamente:



$$W + Q_2 = Q_1$$

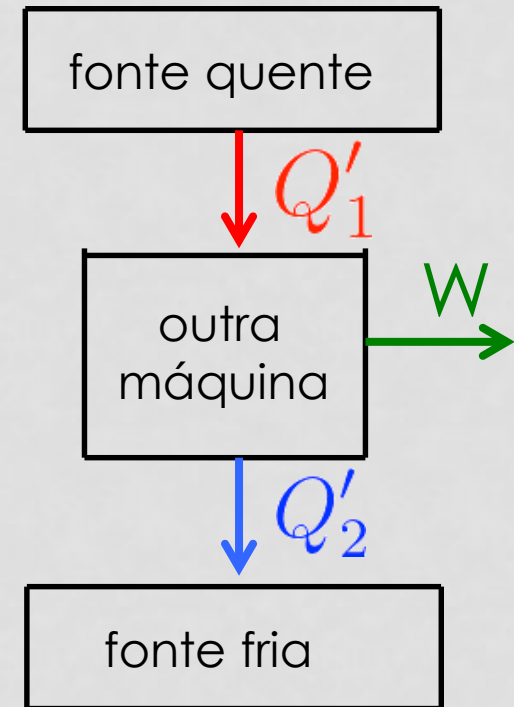
CICLO DE CARNOT

- Esquemáticamente:



$$W + Q_2 = Q_1$$

Considere outra máquina que realiza o mesmo trabalho W :



$$W + Q'_2 = Q'_1$$

CICLO DE CARNOT

- Suponha $\eta' > \eta$. Assim,

$$\frac{W}{Q'_1} > \frac{W}{Q_1}$$

CICLO DE CARNOT

- Suponha $\eta' > \eta$. Assim,

$$\frac{W}{Q'_1} > \frac{W}{Q_1}$$

- Logo,

$$Q'_1 < Q_1$$

- Como o trabalho em cada ciclo é igual temos

$$Q'_1 - Q'_2 = Q_1 - Q_2$$

CICLO DE CARNOT

- Suponha $\eta' > \eta$. Assim,

$$\frac{W}{Q'_1} > \frac{W}{Q_1}$$

- Logo,

$$Q'_1 < Q_1$$

- Como o trabalho em cada ciclo é igual temos

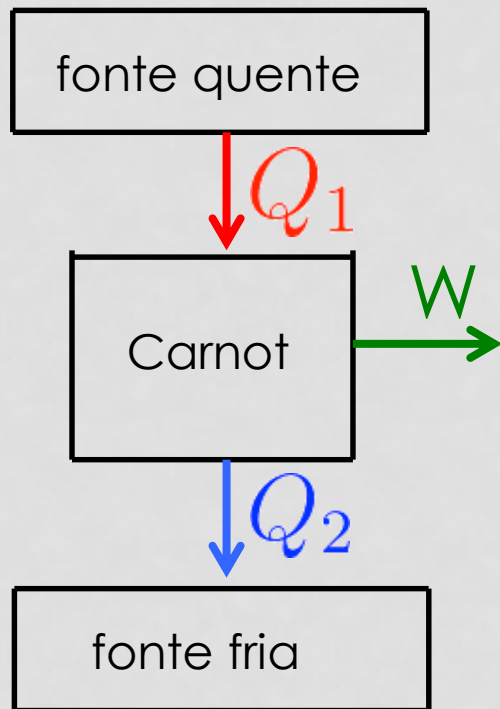
$$Q'_1 - Q'_2 = Q_1 - Q_2$$

- donde

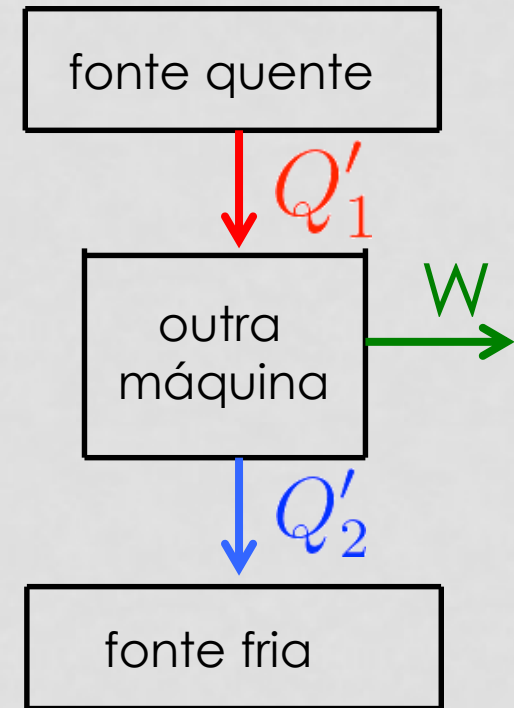
$$Q'_2 < Q_2$$

CICLO DE CARNOT

- Vimos que se $\eta' > \eta$ então $Q'_1 < Q_1$ e $Q'_2 < Q_2$.



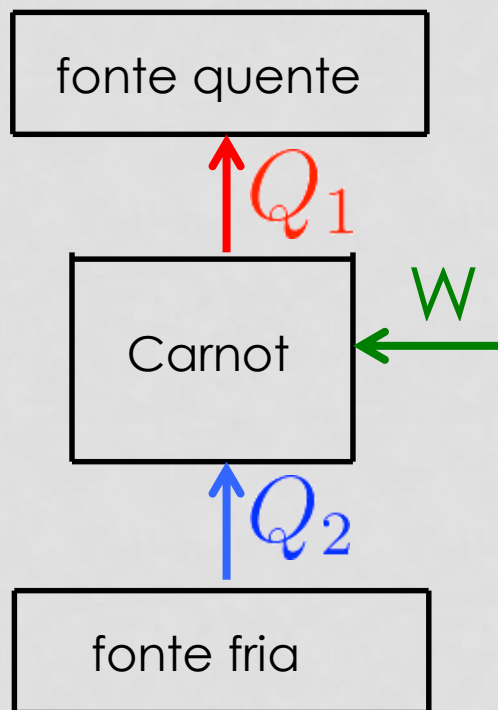
$$W + Q_2 = Q_1$$



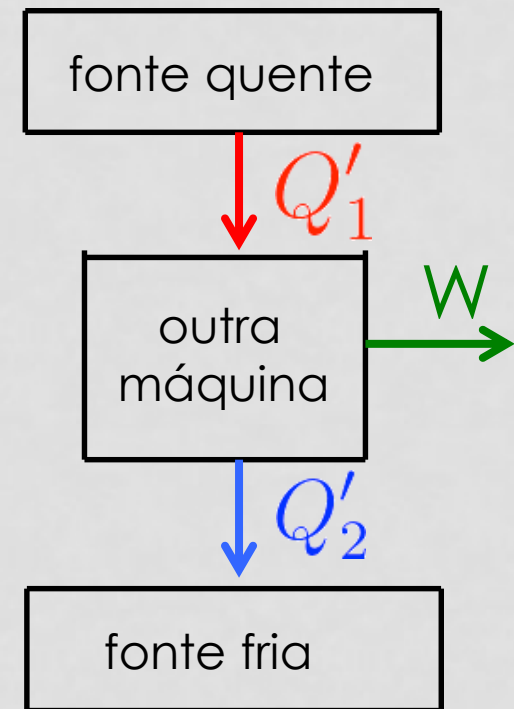
$$W + Q'_2 = Q'_1$$

CICLO DE CARNOT

- Vimos que se $\eta' > \eta$ então $Q'_1 < Q_1$ e $Q'_2 < Q_2$.
 - Carnot é reversível : Pode funcionar como um refrigerador!



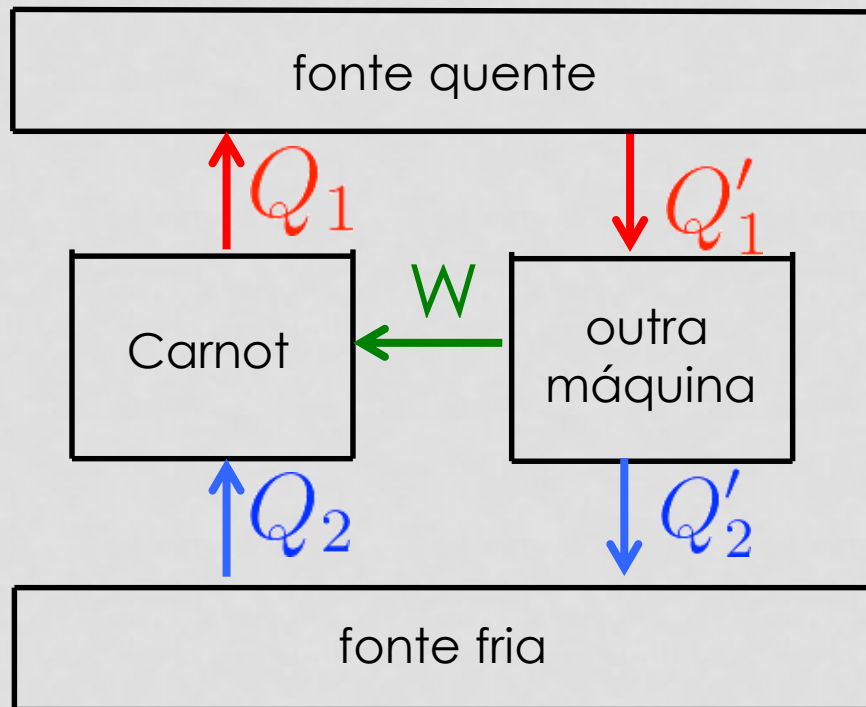
$$W + Q_2 = Q_1$$



$$W + Q'_2 = Q'_1$$

CICLO DE CARNOT

- Vimos que se $\eta' > \eta$ então $Q'_1 < Q_1$ e $Q'_2 < Q_2$.
 - Façamos estas duas máquinas funcionarem conjuntamente:

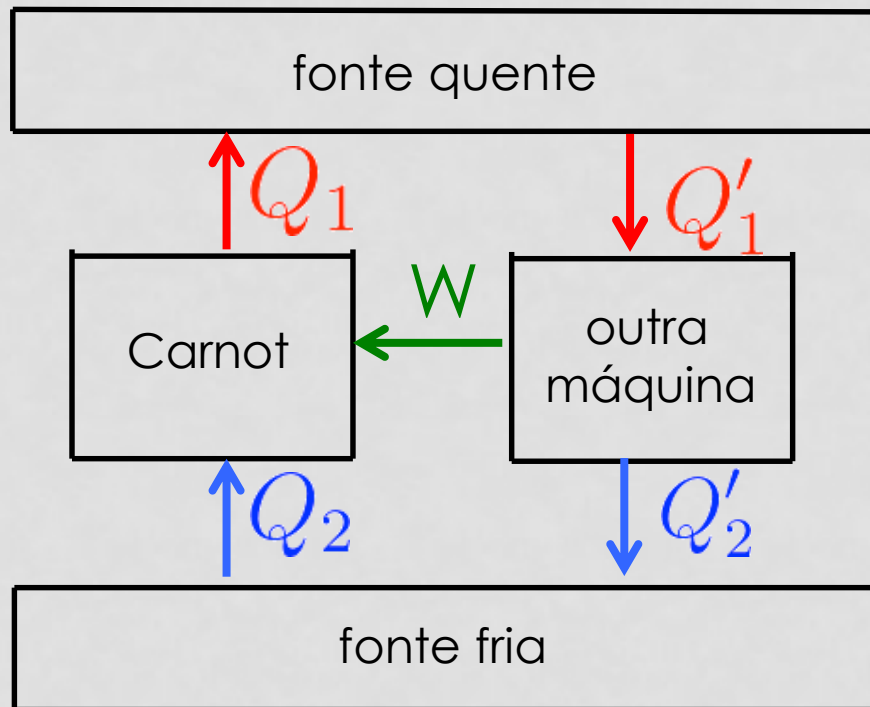


Balanco global da máquina:

Retira $Q_2 - Q'_2 > 0$ da fonte fria e o transfere à fonte quente

CICLO DE CARNOT

- Vimos que se $\eta' > \eta$ então $Q'_1 < Q_1$ e $Q'_2 < Q_2$.
 - Façamos estas duas máquinas funcionarem conjuntamente:



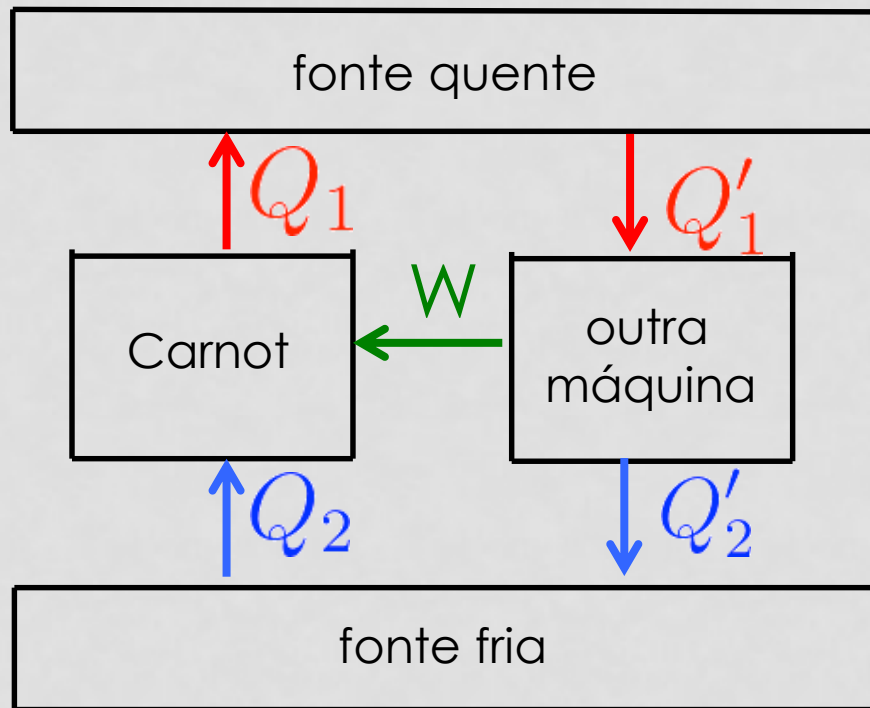
Balanco global da máquina:

Retira $Q_2 - Q'_2 > 0$ da fonte fria e o transfere à fonte quente

Refrigerador ideal!

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!



Balanco global da máquina:

Retira $Q_2 - Q'_2 > 0$ da fonte fria e o transfere à fonte quente

Refrigerador ideal!

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
 - Caso mais geral: A outra máquina realiza trabalho W' e nossa máquina de Carnot realiza trabalho W .

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
 - Caso mais geral: A outra máquina realiza trabalho W' e nossa máquina de Carnot realiza trabalho W .
 - W'/W pode ser aproximado por um número racional com a precisão desejada. Seja

$$\frac{W}{W'} = \frac{m}{n}$$

- com m e n inteiros. Nossa demonstração anterior se aplica fazendo n ciclos de Carnot e m ciclos da outra máquina.

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
- **Todas** as máquinas operando entre as mesmas fontes têm rendimento **no máximo igual** a de Carnot!

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
 - **Todas** as máquinas operando entre as mesmas fontes têm rendimento **no máximo igual** a de Carnot!
- Caso a outra máquina também seja reversível podemos aplicar o mesmo raciocínio mas agora mantendo Carnot operando no sentido normal e invertendo a outra máquina. Assim, concluímos que nesse caso $\eta' \geq \eta$.

CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
 - **Todas** as máquinas operando entre as mesmas fontes têm rendimento **no máximo igual** a de Carnot!
- Caso a outra máquina também seja reversível podemos aplicar o mesmo raciocínio mas agora mantendo Carnot operando no sentido normal e invertendo a outra máquina. Assim, concluímos que nesse caso $\eta' \geq \eta$.
 - Desta forma, todas as máquinas reversíveis operando entre T_f e T_q possuem a mesma eficiência.

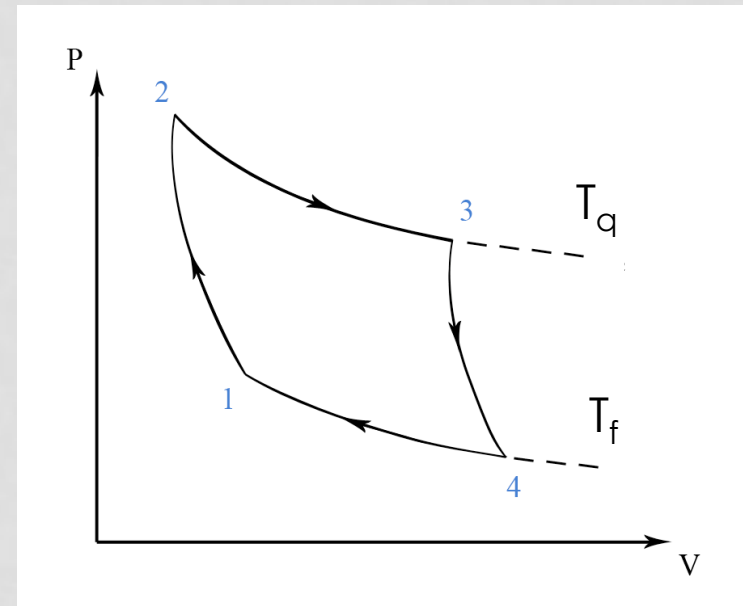
CICLO DE CARNOT

- Logo devemos ter $\eta' \leq \eta$!
 - **Todas** as máquinas operando entre as mesmas fontes têm rendimento **no máximo igual** a de Carnot!
- Caso a outra máquina também seja reversível podemos aplicar o mesmo raciocínio mas agora mantendo Carnot operando no sentido normal e invertendo a outra máquina. Assim, concluímos que nesse caso $\eta' \geq \eta$.
 - Desta forma, todas as máquinas reversíveis operando entre T_f e T_q possuem a mesma eficiência.
- Calculemos, então, a eficiência de um ciclo de Carnot operando entre T_f e T_q .

CICLO DE CARNOT

- Temos

$$\eta = 1 - \frac{Q_{perdido}}{Q_{ganho}}$$



CICLO DE CARNOT

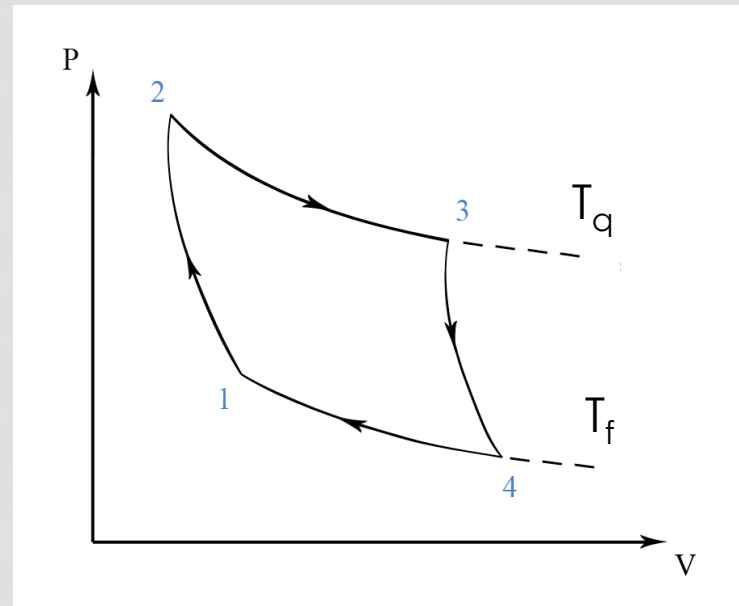
- Temos

$$\eta = 1 - \frac{Q_{perdido}}{Q_{ganho}}$$

- Como 1-→2 e 3-→4 são adiabáticas, temos:

$$Q_{ganho} = Q_{2 \rightarrow 3}$$

$$Q_{perdido} = -Q_{4 \rightarrow 1}$$



CICLO DE CARNOT

- Temos

$$\eta = 1 - \frac{Q_{perdido}}{Q_{ganho}}$$

- Como 1-→2 e 3-→4 são adiabáticas, temos:

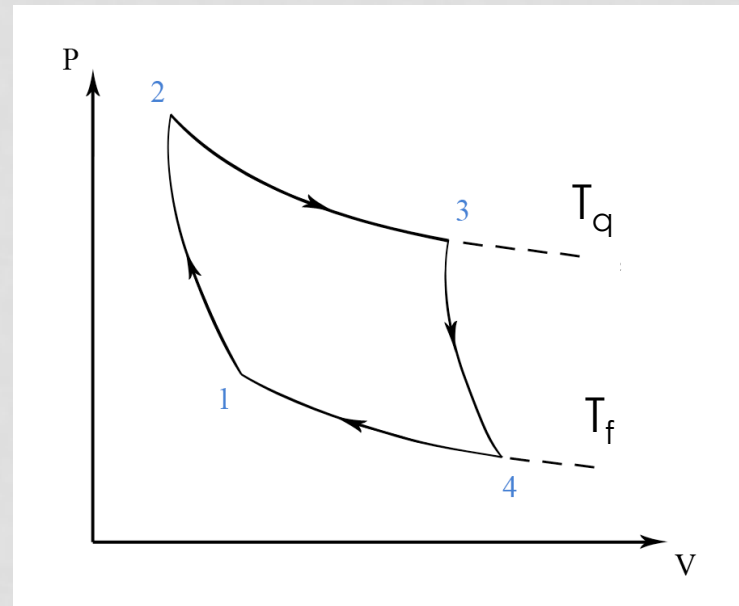
$$Q_{ganho} = Q_{2 \rightarrow 3}$$

$$Q_{perdido} = -Q_{4 \rightarrow 1}$$

Como 2-→3 e 4-→1 são isotermas:

$$Q_{2 \rightarrow 3} = W_{2 \rightarrow 3}$$

$$Q_{4 \rightarrow 1} = W_{4 \rightarrow 1}$$



CICLO DE CARNOT

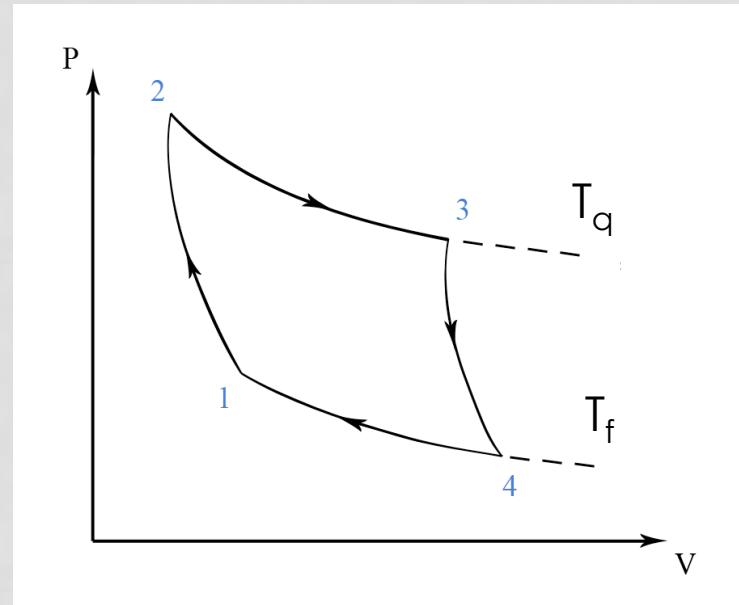
- Temos

$$\eta = 1 - \frac{Q_{perdido}}{Q_{ganho}}$$

- Assim:

$$Q_{perdido} = nRT_f \ln \left(\frac{V_4}{V_1} \right)$$

$$Q_{ganho} = nRT_q \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)$$



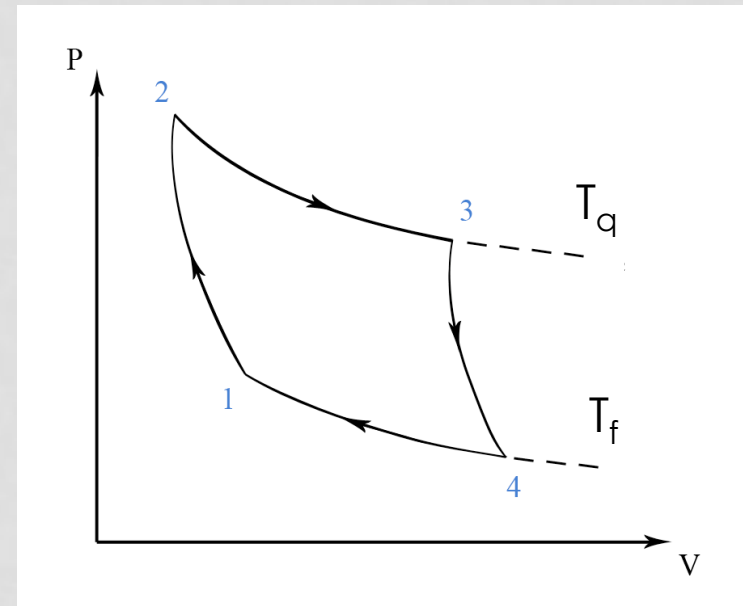
CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f \ln \left(\frac{V_4}{V_1} \right)}{T_q \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)}$$

$$Q_{perdido} = nRT_f \ln \left(\frac{V_4}{V_1} \right)$$

$$Q_{ganho} = nRT_q \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)$$



CICLO DE CARNOT

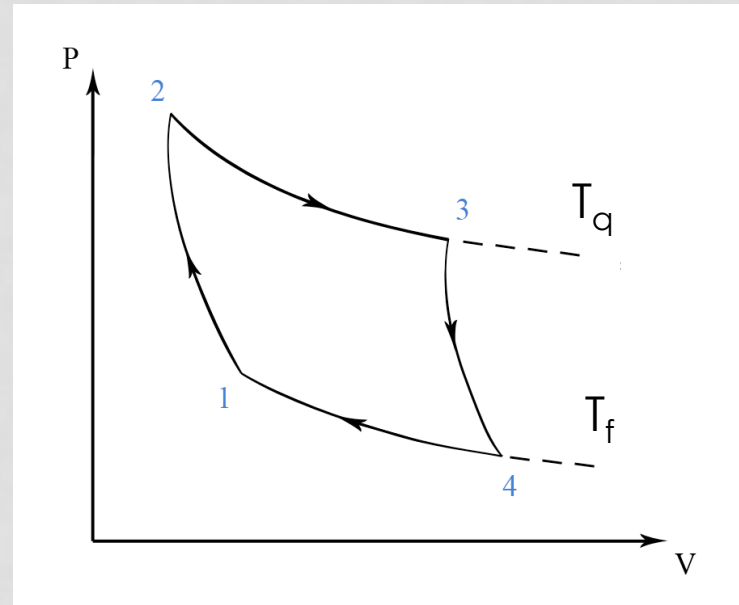
- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f \ln \left(\frac{V_4}{V_1} \right)}{T_q \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)}$$

Como 1->2 e 3-> são adiabáticas:

$$T_f V_1^{\gamma-1} = T_q V_2^{\gamma-1}$$

$$T_f V_4^{\gamma-1} = T_q V_3^{\gamma-1}$$



CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f \ln \left(\frac{V_4}{V_1} \right)}{T_q \ln \left(\frac{V_3}{V_2} \right)}$$

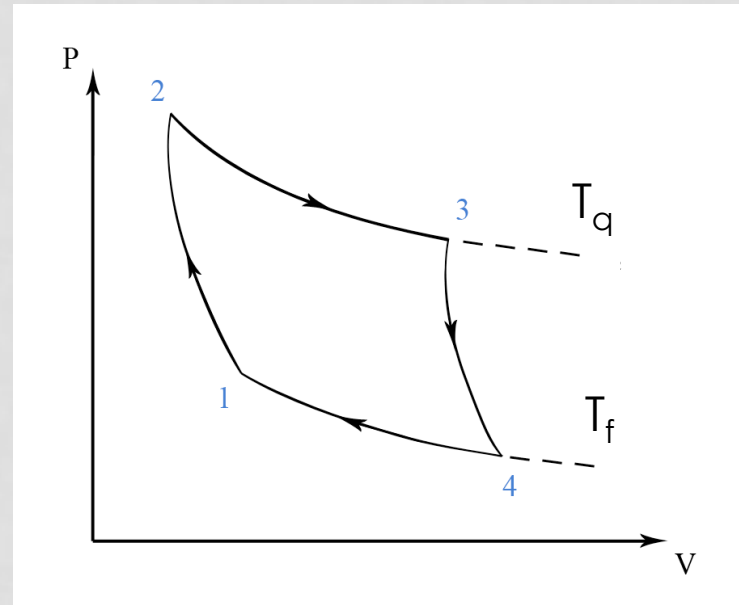
Como 1->2 e 3-> são adiabáticas:

$$T_f V_1^{\gamma-1} = T_q V_2^{\gamma-1}$$

$$T_f V_4^{\gamma-1} = T_q V_3^{\gamma-1}$$

Assim:

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2}$$

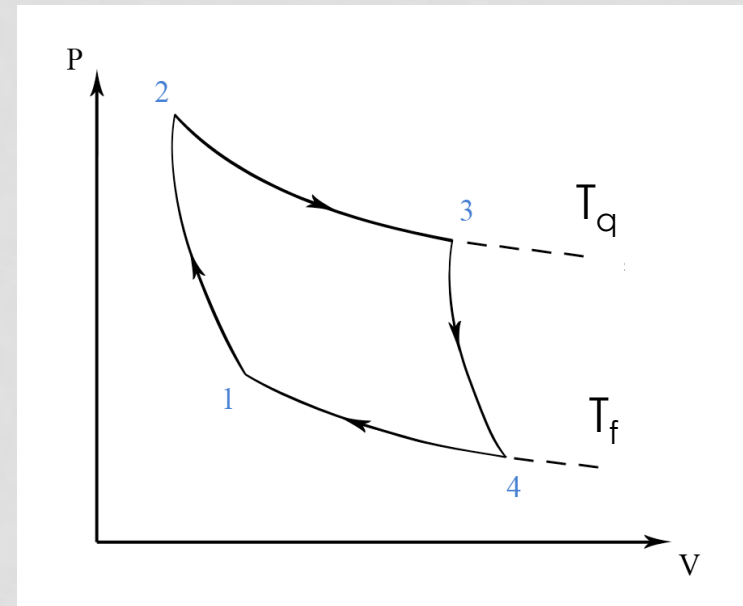


CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

$$\frac{V_4}{V_1} = \frac{V_3}{V_2}$$



CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

- Em resumo:
 - A fórmula acima fornece a eficiência de um ciclo de Carnot (que é reversível) operando entre T_f e T_q .

CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

- Em resumo:
 - A fórmula acima fornece a eficiência de um ciclo de Carnot (que é reversível) operando entre T_f e T_q .
 - T deve ser medido em Kelvin (utilizamos a equação dos gases ideais na demonstração).

CICLO DE CARNOT

- Portanto:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$$

- Em resumo:
 - A fórmula acima fornece a eficiência de um ciclo de Carnot (que é reversível) operando entre T_f e T_q .
 - T deve ser medido em Kelvin (utilizamos a equação dos gases ideais na demonstração).
 - Pelo que demonstramos anteriormente, esta é a maior eficiência possível para **qualquer** máquina operando entre estas temperaturas.

COMENTÁRIOS FINAIS

- Note que nossa demonstração foi totalmente geral e mostra que qualquer máquina operando reversivelmente entre uma fonte fria e uma fonte quente possui a mesma **eficiência**.

COMENTÁRIOS FINAIS

- Note que nossa demonstração foi totalmente geral e mostra que qualquer máquina operando reversivelmente entre uma fonte fria e uma fonte quente possui a mesma **eficiência**.
 - Isto independe do material utilizado. Em nossa demonstração da eficiência utilizamos gases ideais, mas o resultado é muito mais geral do que isso.

COMENTÁRIOS FINAIS

- Note que nossa demonstração foi totalmente geral e mostra que qualquer máquina operando reversivelmente entre uma fonte fria e uma fonte quente possui a mesma **eficiência**.
 - Isto independe do material utilizado. Em nossa demonstração da eficiência utilizamos gases ideais, mas o resultado é muito mais geral do que isso.
- Poderíamos usar a generalidade de nosso resultado para definir a escala absoluta de temperatura.

COMENTÁRIOS FINAIS

- Note que nossa demonstração foi totalmente geral e mostra que qualquer máquina operando reversivelmente entre uma fonte fria e uma fonte quente possui a mesma **eficiência**.
 - Isto independe do material utilizado. Em nossa demonstração da eficiência utilizamos gases ideais, mas o resultado é muito mais geral do que isso.
- Poderíamos usar a generalidade de nosso resultado para definir a escala absoluta de temperatura.

COMENTÁRIOS FINAIS

- Note que nossa demonstração foi totalmente geral e mostra que qualquer máquina operando reversivelmente entre uma fonte fria e uma fonte quente possui a mesma **eficiência**.
 - Isto independe do material utilizado. Em nossa demonstração da eficiência utilizamos gases ideais, mas o resultado é muito mais geral do que isso.
- Poderíamos usar a generalidade de nosso resultado para definir a escala absoluta de temperatura
 - Obteríamos a mesma escala de temperatura que a fornecida pelos gases ideais.