Equipe Indecisos

Questão final - parte um

---

1 Programa

O programa é implementado em C através de três arquivos de código e seus *headers*. Cada programa descrito pela questão é efetivamente implementado como um módulo. Embora em um sistema real cada programa seria executado em um computador diferente, sendo necessária uma interface entre cada um, nossa solução para o problema simula o sistema inteiro em apenas um programa, sendo a comunicação entre os módulos feita acessando diretamente as funções e variáveis de cada um. Além disso, em algumas funções que dependem de informações exteriores - por exemplo, a posição de um guindaste ou o fato do botão de emergência ter sido pressionado - essas informações são simuladas pelo programa. O código do programa pode ser encontrado também na página do Github: <https://github.com/klement01/eletrochallenge2020-final>.

1.1 Módulo de bombas

Inclui uma estrutura que agrega as informações sobre todas a bombas de uma plataforma - seus estados, os estados das luzes indicadoras, etc. - e todas as funções necessárias para seu controle. O estado de cada uma das 25 séries de bombas da plataforma é controlado por uma variável em uma *array* da *struct* Bombas, e pode ser *true* quando a série está ativa e *false* quando a série está inativa.

1.2 Módulo de guindastes

Inclui uma estrutura que agrega as informações sobre todas os guindastes de uma plataforma e sobre o navio atracado que está sendo carregado por esses guindastes, além de todas as funções necessárias para seu controle. O estado de cada um dos 10 guindastes da plataforma é controlado por uma variável em uma *array* da *struct* Guindastes, e pode ser *true* quando o guindaste está ativo e *false* quando o guindaste está inativo.

Além de ter funções para o controle dos guindastes, o módulo também conta com funções que simulam a mudança de posição dos guindastes ao longo do tempo. Essa simulação assume algumas coisas: o tempo necessário para um guindaste coletar um barril e carregá-lo no navio é sempre igual, e a energia consumida por um guindaste ativo é sempre igual. Em um sistema real, as informações de consumo de energia e posição dos guindastes poderiam ser fornecidas ao programa por sensores externos, em vez de simuladas.

1.3 Módulo de energia

O módulo de energia é o pilar central do programa, contendo a função *main*. Ele calcula o consumo e fornecimento de energia, e comanda o fornecimento de energia da termelétrica e os módulos de controle das bombas e guindastes de acordo com essas informações. O controle do fornecimento da termelétrica é feito através de uma fração, que representa a fração total da energia fornecida pela usina que deve ser direcionada à plataforma. O controle dos outros módulos é feito através da alteração da quantidade de componentes ativos em cada um deles.

O módulo também permite a interação com o usuário, através de dois modos: o modo de custo e o modo interativo. O modo de custo, acessado abrindo o programa com o argumento *custo*, simula um mês de operação da plataforma sob condições ideais, ou seja, com operação ininterrupta de todos os guindastes e bombas. Baseado nisso, ele calcula o custo operacional diário e mensal da plataforma, de acordo com as especificações da questão. Esse modo opera como se houvesse um navio atracado na plataforma com capacidade extrema de barris. Isso simula uma situação em que o tempo de troca de navios é negligível, como por exemplo, se no momento que um navio sai, já há outro esperando para ser carregado.

Quando aberto sem argumentos, ou com o argumento *-t*, o programa entra no modo interativo, que permite o controle direto da simulação da plataforma. Nesse modo, o número de guindastes e bombas ativos pode ser controlado diretamente. Também é possível ver a demanda da usina e o custo segundo por segundo, entre outras coisas. No modo interativo, o tempo entre o carregamento de um navio e a chegada de outro deve ser controlado manualmente.

A plataforma é simulada passo a passo, em que cada passo representa um segundo. Durante esse passo, são determinadas a quantidade de guindastes que devem permanecer ativos, baseada no horário, na presença ou ausência de um navio, e na capacidade do navio. Também é calculada a porcentagem da capacidade da termelétrica que deve ser direcionada à plataforma, baseada na porção da demanda que é gerada pelo parque eólico e pelo número de guindastes e bombas ativos, além da demanda de energia dos sistemas auxiliares. Finalmente, ao final de cada passo, o custo da operação durante esse passo é calculado, baseado na demanda da termelétrica.

2 Cálculos

Essa seção contém os cálculos de todas as grandezas utilizadas para o controle da plataforma que são especificadas pela questão, mas não são dados diretamente.

2.1 Potência das turbinas eólicas

A potência de uma turbina eólica, como definida pelo desafio, depende da velocidade angular das pás, que depende da velocidade do vento, que depende do horário do dia. Portanto, uma função que calcule a potência fornecida pela usina necessita saber apenas o horário do dia. Entre as 07:00 e as 22:00, a velocidade do vento é de 6 m/s, ocasionando uma velocidade angular de 4 rpm e uma potência de 80 kW, como pode ser visto nos gráficos. No resto do dia, a velocidade do vento é de 10 m/s, ocasionando uma velocidade angular de 8 rpm e uma potência de 70 kW. Para calcular a potência efetiva do parque eólico, é necessário multiplicar a potência de cada catavento pelo número de cataventos, 50, e a eficiência do inversor, 95%. Isso resume a função que determina a potência das turbinas eólicas a:

```
função Potência Do Parque Eólico (Horário (h)):
     se Horário é entre 7 e 22:
          retorna 3.800 (kW)
     se não:
          retorna 3.325 (kW)
```

2.2 Potência e custo da usina termelétrica

A potência da termelétrica é descrita pela equação, onde *P* é a potência, *PCS* é o poder calorífico superior, *v* é a vazão e E_c, E_t e E_g são as eficiências da caldeira, turbina e gerador, respectivamente:

$$P = PCS \times v \times E_c \times E_t \times E_g$$

$$P = PCS \times v \times (-1,1094v^2 + 1,2861v - 2,18461) \times 0.90 \times 0.87$$

A vazão e por consequência o combustível, que determina o *PCS*, são escolhidos de modo a maximizar a potência da usina. Essa vazão foi determinada por força bruta usando um *script* de *Python*, que calculou a potência da usina em todas as faixas de vazão descritas pela questão, e determinou que a vazão ideal é de 26 ton / h, que gera 231.009 kW.

```
z = 16 ton/h -> p = 130554.43184 MJ/h
z = 17 ton/h -> p = 154110.54777999996 MJ/h
z = 18 ton/h -> p = 175980.22092000014 MJ/h
z = 19 ton/h -> p = 195580.4860100001 MJ/h
z = 20 ton/h -> p = 212328.3778 MJ/h
z = 21 ton/h -> p = 145822.37040000013 MJ/h
z = 22 ton/h -> p = 151828.8581333334 MJ/h
z = 23 ton/h -> p = 154861.73661666675 MJ/h
z = 24 ton/h -> p = 154544.25959999987 MJ/h
z = 25 ton/h -> p = 150499.6808333334 MJ/h
z = 26 ton/h -> p = 831631.0106000011 MJ/h
z = 27 ton/h -> p = 757850.9404500002 MJ/h
z = 28 ton/h -> p = 655693.7758000009 MJ/h
z = 29 ton/h -> p = 522958.52540000086 MJ/h
z = 30 ton/h -> p = 357444.19800000044 MJ/h
>>>
```

Imagem 1: Potência da usina usando vazões diferentes.

O custo por kWh da energia gerada pela usina é determinado pelo custo do combustível utilizado em uma hora dividido pela energia gerada nesse intervalo de tempo, através da seguinte equação, onde ρ é a densidade do combustível, *PC* é o preço do combustível e *C* é o custo do combustível em *R$ / kWh*:

$$C = 1h \times (v \div \rho) \times PC \div (1h \times P)$$

O custo determinado foi de R$ 0,478 / kWh. Porém, a energia que deve ser direcionada da usina à plataforma é maior que a energia que a plataforma demanda, pois parte da energia é dissipada pelo inversor. Levando em conta que o consumo real de energia é maior que o utilizado, ou seja, dividindo a demanda de energia pela eficiência do inversor, descobre-se que o custo efetivo da energia produzida pela usina e enviada à plataforma é de aproximadamente R$ 0,503 / kWh.

2.3 Cargas constantes

Os sistemas auxiliares são cargas constantes, e são divididos pela questão em dois grupos: o primeiro deles consome 3,6 MW, e o segundo 20 kW. O consumo de energia total dos sistemas auxiliares é 3.620 kW, que é a soma do consumo destes dois grupos.

As bombas, embora estejam ligadas 24 h por dia em situações ideais, podem ser desligadas no caso de emergência, e portanto não são tratadas como cargas constantes. Em vez disso, seu consumo é calculado do mesmo modo que o dos guindastes, ou seja, a energia consumida por elas em cada passo da simulação é igual ao consumo por série de bombas, 40 kW, multiplicado pelo número de séries ativas e pelo tempo passado.

3 Estimativas

Essa seção contém estimativas de todas as grandezas utilizadas para o controle da plataforma que não foram especificadas pela questão.

3.1 Tempo de coleta e carregamento dos barris

A estimativa do tempo de coleta e carregamento dos barris foi feita assumindo que um guindaste sempre leva o mesmo tempo para carregar um barril no navio, após um barril ter sido coletado, e coletar um novo barril, após o último ter sido carregado.

Além disso, consideramos a altura de uma plataforma com sendo de 20 metros e a altura do topo do navio cargueiro até a linha da água como sendo de 5 metros, portanto, descendo um barril por cerca de 15 metros de altura. O raio em que o guindaste recolhe o barril e posteriormente deposita-o no navio foi considerado constante e de 10 metros. Ademais, foi considerado que o guindaste realiza uma rotação de 90 graus nesse movimento. As acelerações e velocidades máximas atribuídas ao guindaste podem ser vistas a seguir:

- Aceleração e desaceleração horizontal: 0,50 m/s^2.
- Velocidade máxima horizontal com barril: 2,0 m/s.
- Velocidade máxima vertical com barril: 1,0 m/s.
- Velocidade máxima horizontal sem barril: 2,5 m/s.
- Velocidade máxima vertical sem barril: 1,5 m/s.

A partir dos dados expostos, podemos calcular o deslocamento do barril como sendo de um quarto de círculo de raio 10 metros no sentido horizontal e de 15 metros no sentido vertical. A seguir pode ser visualizado o cálculo do deslocamento horizontal:

$$\Delta D_{horizontal} = \frac{2\pi 10}{4} \cong 15{,}71\ metros$$

O cálculo de tempo de cada um dos trajetos feitos pelo barril pode ser visto abaixo:

$$\Delta t_{ahb} = \frac{2}{0,5} = 4\,s \quad \Delta t_{avb} = \frac{1}{0,5} = 2\,s \quad \Delta t_{ahsb} = \frac{2,5}{0,5} = 5\,s \quad \Delta t_{avsb} = \frac{1,5}{0,5} = 3\,s$$

$$\Delta s_{hb} = \frac{0,5*4^2}{2} = 4\,m \quad \Delta s_{vb} = \frac{0,5*2^2}{2} = 1\,m$$

$$\Delta s_{hsb} = \frac{0,5*5^2}{2} = 6,25\,m \quad \Delta s_{vsb} = \frac{0,5*3^2}{2} = 2,25\,m$$

$$\Delta t_{hsb} = \frac{15,71 - 2(\Delta s_{hb})}{2} + 2\Delta t_{ahb} = \frac{15,71 - 2(4)}{2} + 2*4 \cong 11,85\,s$$

$$\Delta t_{vb} = \frac{15 - 2(\Delta s_{vb})}{1} + 2\Delta t_{avb} = \frac{15 - 2(1)}{1} + 2*2 = 17,00\,s$$

$$\Delta t_{hsb} = \frac{15,71 - 2(\Delta s_{hsb})}{2,5} + 2\Delta t_{ahsb} = \frac{15,71 - 2(6,25)}{2,5} + 2*5 \cong 11,28\,s$$

$$\Delta t_{vsb} = \frac{15 - 2(\Delta s_{vsb})}{1,5} + 2\Delta t_{avsb} = \frac{15 - 2(2,25)}{1,5} + 2*3 = 13,00\,s$$

A seguir estão abreviações usadas para nesses cálculos:

- *h* = horizontal;
- *v* = vertical;
- *a* = aceleração;
- *b* = com barril;
- *sb* = sem barril.

Dessa maneira, é possível observar que a variação de tempo será maior na componente vertical do que na horizontal, totalizando 17 segundos para o barril ser posto no barco e 13 segundos para o guindaste voltar ao seu ponto de origem.

3.2 Densidade do aço

Primeiramente foram medidos os parafusos com paquímetro digital (nesse experimento foram considerados os parafusos como sendo dois cilindros de raios diferentes com um furo de formato hexagonal na cabeça do parafuso). As medidas encontradas podem ser vistas a seguir:

- Diâmetro do primeiro cilindro: 0,477 cm.
- Altura do primeiro cilindro: 2,489 cm.
- Diâmetro do segundo cilindro: 0,850 cm.
- Altura do segundo cilindro: 0,493 cm.
- Diâmetro de um círculo circunscrito ao furo hexagonal: 0,400 cm.
- Altura do furo hexagonal: 0,280 cm.

A partir dessas medidas foram calculados os volumes desses três sólidos como pode ser visto nos Cálculos. Depois disso, foi calculado o volume total de um parafuso que ficou sendo aproximadamente 0,686 cm^3.

Logo após, 10 parafusos foram pesados na balança digital de precisão, obtendo uma leitura de 47 gramas. Portanto, cada parafuso tem massa de aproximadamente 4,7 gramas. Para obter a densidade do aço dos parafusos, foi dividido a massa de 4,7 gramas pelo volume de 0,686 cm^3, dessa maneira obtendo uma densidade de 6,9 g/cm^3 para o aço. Os cálculos feitos podem ser vistos a seguir:

$$V_1 = 2{,}489\pi(0{,}477/2)^2 \cong 0{,}445\ cm^3$$

$$V_2 = 0{,}493\pi(0{,}850/2)^2 \cong 0{,}280\ cm^3$$

$$V_3 = 0{,}280\left(\frac{6\,(0{,}400/2)^2\sqrt{3}}{3}\right) \cong 0{,}039\ cm^3$$

$$V_t = V_1 + V_2 - V_3 \cong 0{,}686\ cm^3$$

$$d = \frac{M}{V_t} = \frac{4{,}7}{0{,}686} \cong 6{,}9\ g/cm^3$$

3.3 Massa do guindaste e dos cabos de aço

Para determinar a massa de um guindaste, a nossa equipe construiu um modelo 3D de guindaste no software Fusion 360. Esse modelo tem 43 metros de comprimento por 7 metros de largura e 37 metros de altura. Como esse modelo foi feito sem consultar a internet, ele pode ter variações quando comparado a um guindaste normal de uma plataforma de petróleo. A seguir são demonstradas algumas imagens do modelo.

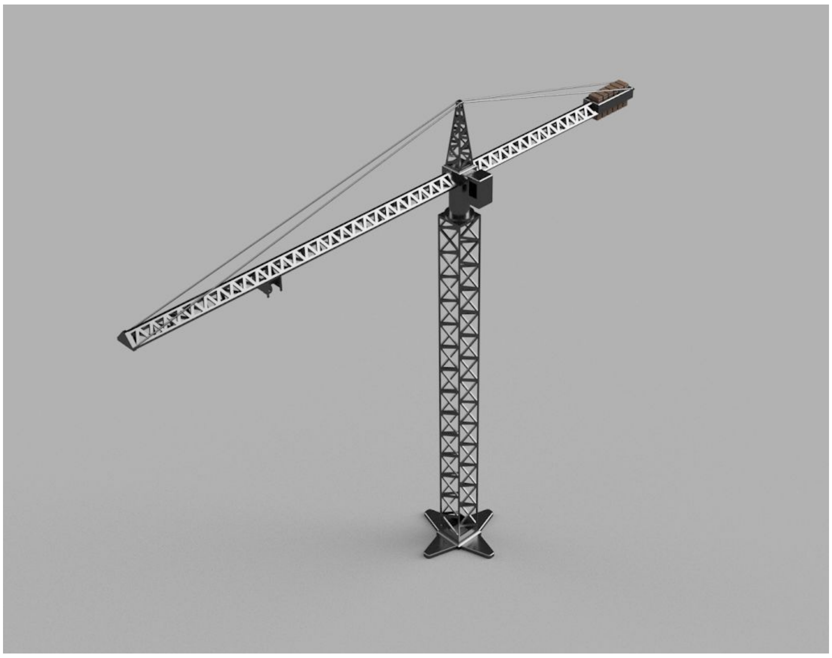

Imagem 2: Vista isométrica do guindaste.

Imagem 3: Vista lateral do guindaste.

Depois disso, foi observado o volume desse modelo no software (imagem 4). Assim, utilizando a densidade encontrada no item 3.2, podemos calcular a massa de um guindaste. O valor encontrado foi de aproximadamente 189,7 toneladas. A imagem 4 e os cálculos podem ser vistos a seguir.

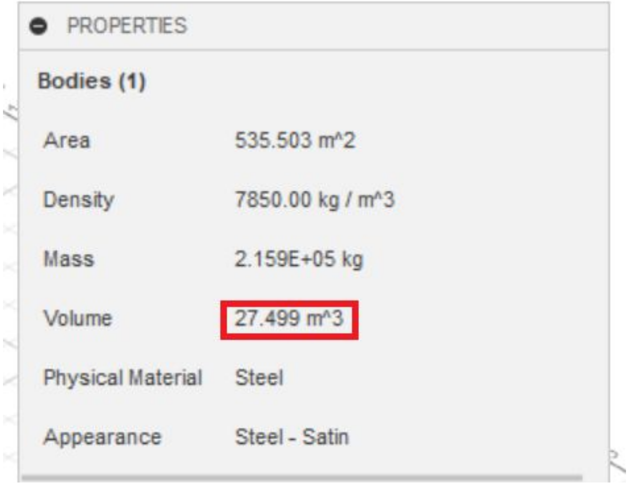

Imagem 4: Volume do guindaste

$$M = V * d * 1000 = 27{,}499 * 6{,}9 * 1000 = 189.743{,}1\ kg \cong 189{,}7\ toneladas$$

Para estimar a massa dos cabos de aço foi considerado que o tamanho máximo que o cabo deveria ter seria de 55 metros (10 metros do raio do guindaste, 15 metros da altura da plataforma até o barco e aproximadamente 30 metros da altura do guindaste. Além, disso, foi considerado que o cabo teria 40 mm de raio. Dessa maneira pode ser calculado o volume do cabo consequentemente a sua massa. Esse cálculo pode ser visto a seguir.

$$M_{cabo} = dV = 6{,}9 * 1000 * (\pi 0{,}04^2 * 55) \cong 1907{,}6\ kg \cong 1{,}9\ toneladas$$

3.4 Potência dos guindastes

A estimativa de potência dos guindastes foi feita assumindo que o consumo de energia de um guindaste ativo pode ser considerada constante, e um guindaste inativo não consome nenhuma energia.

Para determinar a potência de um guindaste, foi utilizado o modelo 3D construído no item 3.3, pois, além da variação de energia potencial do barril, deve ser considerado ainda o deslocamento do braço do guindaste. Para isso, foi separado o guindaste em duas parte, e observado no software o momento de inércia do braço, como pode ser visto na imagem 2. Como esse valor considerava a densidade do aço como sendo aproximadamente 7,85 g/cm^3, o valor de momento de inércia foi multiplicado por 6,9/7,85; assim obtendo um momento de inércia de aproximadamente 114.000.000 kg.m^2.

$$I = 1{,}294 * 10^8 * 6{,}9/7{,}85 \cong 113.740.127{,}3 \ \cong 114 * 10^6\ kgm^2$$

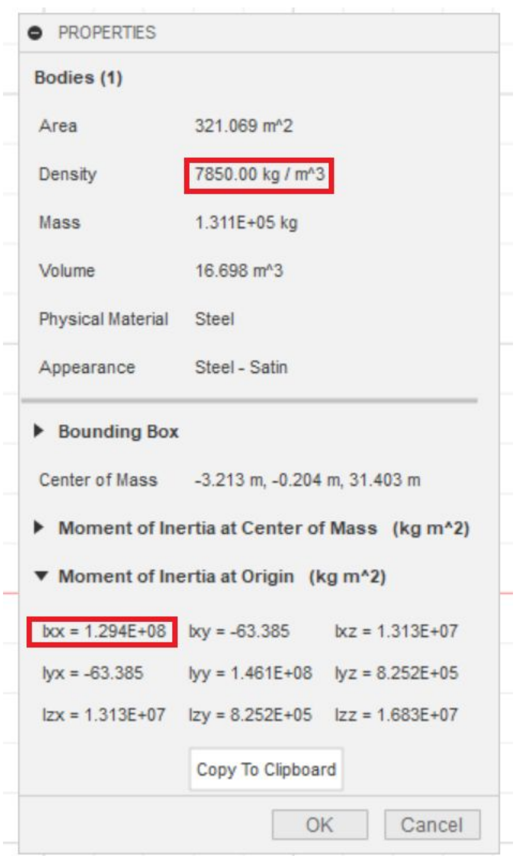

Imagem 5: Momento de inércia e densidade do braço do guindaste.

Podemos calcular ainda, a velocidade que cada um dos movimentos horizontais alcançará em radianos por segundo. No exemplo a seguir wb é a velocidade angular máxima com barril e wsb é a velocidade angular máxima sem barril.

$$w_b = \frac{v_b}{2\pi r} * 2\pi = \frac{2}{10} = 0,2\, radianos/s$$

$$w_{sb} = \frac{v_{sb}}{2\pi r} * 2\pi = \frac{2,5}{10} = 0,25\, radianos/s$$

A partir disso podemos calcular energia gasta para acelerar e desacelerar o braço do guindaste em cada um dos movimentos.

$$E_{a1} + E_{d1} = 2 * (1/2\, I w_b{}^2) = 2 * (1/2 * 114 * 10^6 * 0,2^2) \cong 4,56 * 10^6\, J$$

$$E_{a2} + E_{d2} = 2 * (1/2\, I w_b{}^2) = 2 * (1/2 * 114 * 10^6 * 0,25^2) \cong 7,12 * 10^6\, J$$

Além disso, é necessário calcular a variação de energia do barril de petróleo horizontalmente. Para isso, basta calcular a energia gasta na aceleração e desaceleração do barril, pensando que o barril tem massa igual a 240 kg (200 L * 1,2 kg/L). Esse cálculo pode ser visto a seguir.

Dessa maneira pode ser calculado o gasto de energia do guindaste em 30 segundos como sendo a soma de todas as energias de aceleração e desaceleração.

$$E_{a1} + E_{d1} + E_{a2} + E_{d2} + E_{a3} + E_{d3} = 4,56 * 10^6 + 7,12 * 10^6 + 960\, J = 11.680.960\, J$$

Para obter a potência média dos guindastes, basta dividir esse número por 30 segundos, que é o tempo de repetição de um ciclo. Assim obtemos que a potência média desse guindaste seria de aproximadamente 389 kW.

$$P_m = \frac{\Delta E}{\Delta t} = \frac{11.680.960}{30} \cong 389.365,3\, W \cong 389\, kW$$

3.5 Capacidade do navio

Como foi vetado o uso de internet nesse exercício, a nossa equipe usou a memória para recriar um navio petroleiro no software 3D Fusion 360. O casco do cargueiro, feito pela equipe, tem aproximadamente 120 metros de comprimento por 30 metros de largura 15 metros de altura. Algumas imagens desse modelo 3D podem ser vistas a seguir.

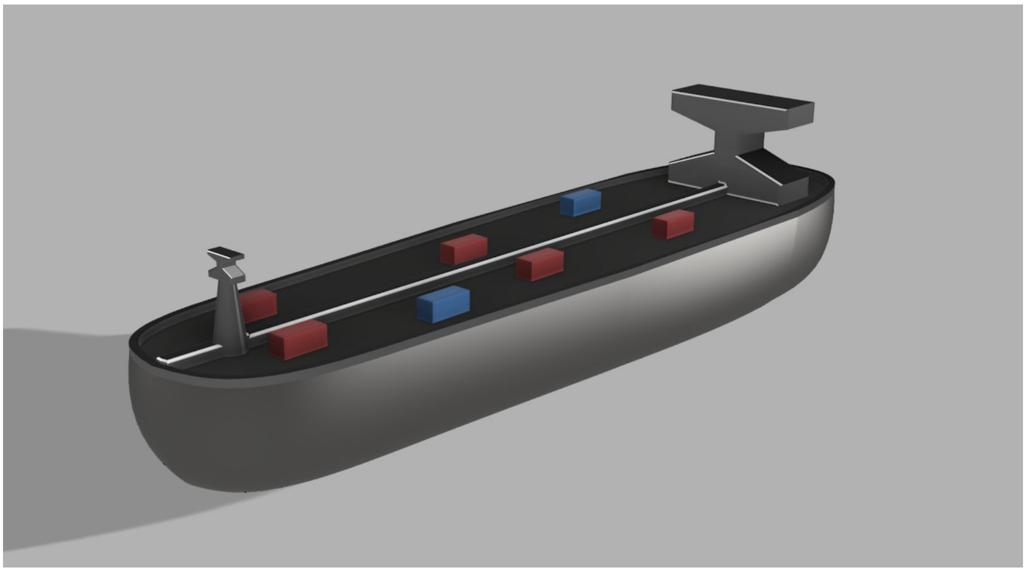

Imagem 6: Vista isométrica do barco.

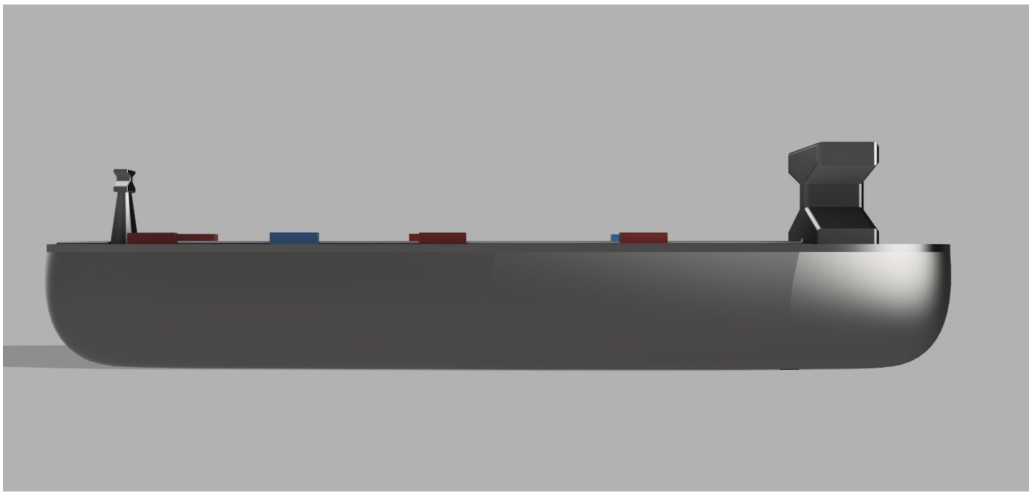

Imagem 7: Vista lateral do barco.

A partir desse modelo, podemos descobrir no programa o volume interno do cargueiro que seria de aproximadamente 44850 m^3, como pode ser visto na imagem 8:

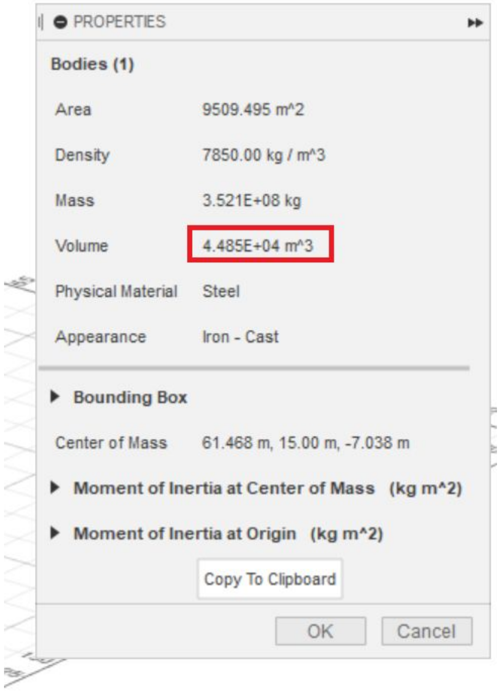

Imagem 8: Volume do navio petroleiro.

Para determinar quantos barris o navio poderia levar, fizemos uma esquema de como os barris ficariam dispostos, o qual pode ser visto na imagem 3. Nesse esquema, pode ser visto um bloco hexagonal de repetição e a partir dele foi calculado a porcentagem máxima de volume que os barris poderiam ocupar no navio. Esse cálculo pode ser visto a seguir:

$$\frac{A_{útil}}{A_{total}} = \frac{3\pi r^2}{\frac{6\sqrt{3}(2r)^2}{4}} \cong 90,68\%$$

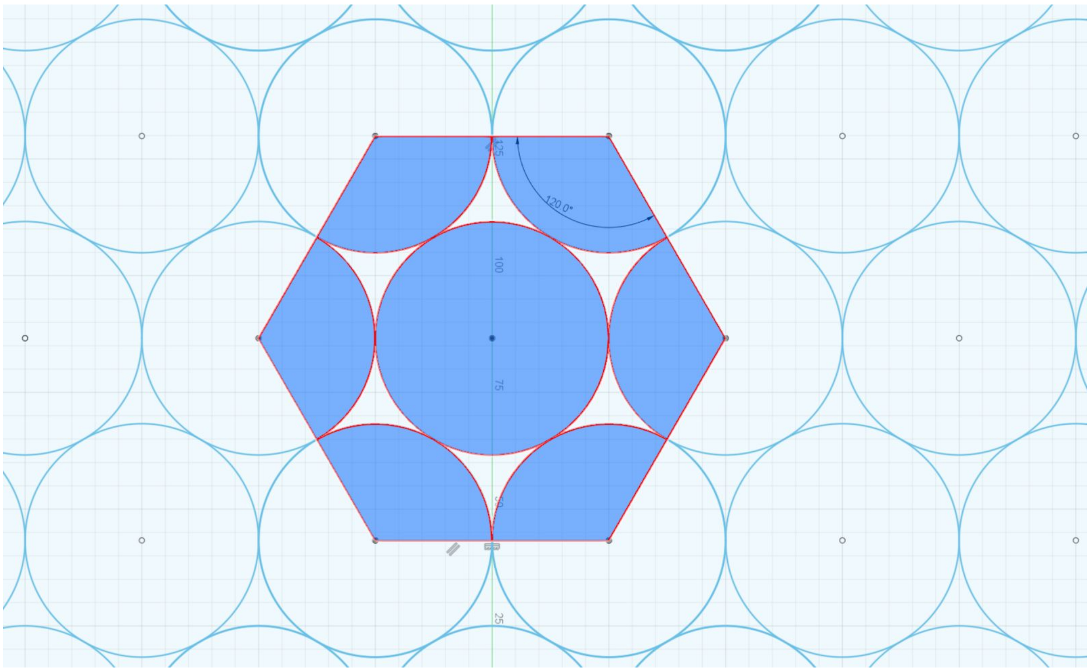

Imagem 9: Representação da organização dos barris.

A partir desses dados podemos calcular o volume útil do navio como sendo 44850 m^3 vezes 90,68%, ou seja aproximadamente 40.669 m^3.

Tendo em vista que o volume de um barril de petróleo é de 0,2 m^3, podemos descobrir a quantidade de barris que esse navio petroleiro pode levar dividindo o volume útil por 0,2 m^3, assim obtemos que esse navio comportaria 203.349 barris de petróleo.

4 Custo diário e mensal

O cálculo do custo diário e mensal assumirá a operação da plataforma em condições ideais, ou seja, com todas as bombas e todos os guindaste operando de maneira ininterrupta. Para esse cálculo, é necessário saber a demanda de energia, em cada horário do dia, e o custo de energia, em cada horário.

A demanda varia de acordo com o número de guindastes que estão ativos. As bombas e os sistemas auxiliares estão ativos 24 h por dia, e representam uma carga constante de 4.620 kW. Os guindastes estão ativos entre as 06:00 e 14:00 e entre as 18:00 e 24:00 (meia noite). Quando todos os guindastes estão ativos, eles representam uma carga de 3.890 kW, elevando a demanda total para 8.510 kW nesses horários. Em pseudocódigo:

```
função Demanda (Horário (h)):
      se Horário é entre 6 e 14 ou 18 e 24:
            retorna 8.510 (kW)
      se não:
            retorna 4.620 (kW)
```

O custo da energia depende de quanta energia deve vir da termelétrica. Essa energia é igual à demanda total, menos a porção da demanda que pode ser providenciada pelo parque eólico. Convenientemente, como a demanda e o custo da energia só mudam de hora em hora, a demanda de potência em kW no início da hora tem o mesmo valor numérico de energia consumida ao longo da hora, em kWh. Basta então multiplicar esse valor pelo preço do kWh, e repetir isso para cada hora do dia. Em pseudocódigo:

```
Custo Diário  = 0
Para cada Hora do dia (0 -> 23):
      Custo Diário += (Demanda(Hora) -
                        Potência Do Parque Eólico (Hora)) * Preço
Custo Mensal = Custo Diário * 30
```

Abaixo, é mostrada a execução de dois programas: o primeiro, custo.py (incluído no repositório do Github e no arquivo de código), calcula os custos diários e mensal da maneira analítica, descrita nesta seção. O segundo, plataforma, obtido ao compilar o código entregue como resposta, e executado com o comando custo, simula a operação da plataforma segundo a segundo durante um mês, registrando o custo da energia a cada passo e derivando então os custos diário e mensal.

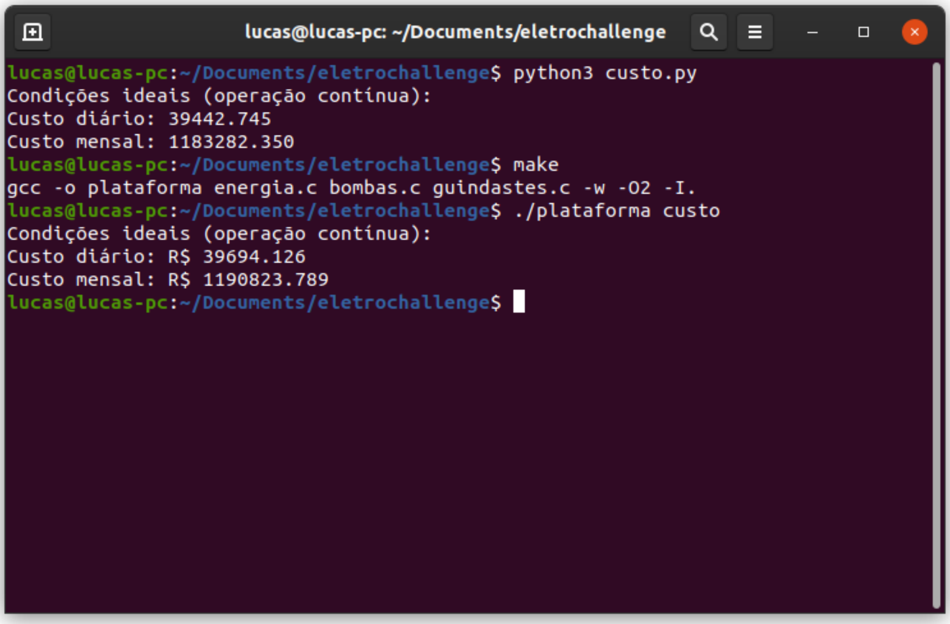

Imagem 10: Execução dos programas.

A diferença entre o valor teórico e o valor simulado, ao longo de um mês, é de 0.63%. Alguns fatores que podem ter contribuído para essa diferença são: uma pequena diferença entre o custo do kWh utilizado pela usina, devido ao fato do primeiro programa usar um valor pré-calculado, enquanto o segundo faz parte dos cálculos na hora da compilação, e pequenas imprecisões devido à ordem em que os estados dos componentes são alterados e o custo é calculado, o que pode gerar erros de até um segundo nos cálculos de consumo de energia do segundo programa.