

Marcos Wagner Jesus Servare Junior

**GERENCIAMENTO ENERGÉTICO E DE
FLUXOS DE PRODUTOS DO SISTEMA
PÁTIO-PORTO DE MINÉRIO DE FERRO**

Vitória

2022

Marcos Wagner Jesus Servare Junior

**GERENCIAMENTO ENERGÉTICO E DE FLUXOS DE
PRODUTOS DO SISTEMA PÁTIO-PORTO DE
MINÉRIO DE FERRO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

Orientador: Prof. Dr. Helder Roberto de Oliveira Rocha

Coorientador: Prof. Dr. José Leandro Félix Salles

Vitória

2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

S491g Servare Junior, Marcos Wagner Jesus, 1987-
GERENCIAMENTO ENERGÉTICO E DE FLUXOS DE
PRODUTOS DO SISTEMA PÁTIO-PORTO DE MINÉRIO DE
FERRO / Marcos Wagner Jesus Servare Junior. - 2022.
104 f.

Orientador: Helder Roberto de Oliveira Rocha.

Coorientador: José Leandro Félix Salles.

Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Planejamento Energético de Pátio de Minério de Ferro. 2. Heurística Baseada em Relaxação Linear. 3. Horizonte de Rolagem. 4. Planejamento e Sequenciamento da Produção. 5. Programação Matemática. I. Rocha, Helder Roberto de Oliveira. II. Salles, José Leandro Félix. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. IV. Título.

CDU: 621.3

Marcos Wagner Jesus Servare Junior

**GERENCIAMENTO ENERGÉTICO E DE FLUXOS DE
PRODUTOS DO SISTEMA PÁTIO-PORTO DE
MINÉRIO DE FERRO**

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Trabalho aprovado. Vitória, 27 de outubro de 2022:



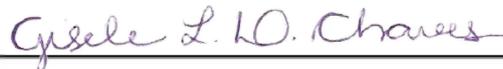
Prof. Dr. José Leandro Félix Salles
Universidade Federal do Espírito Santo
Coorientador



**Prof. Dra. Marcia Helena Moreira
Paiva**
Universidade Federal do Espírito Santo
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Elétrica



**Prof. Dr. Renato Elias Nunes de
Moraes**
Universidade Federal do Espírito Santo
Departamento de Informática



**Prof. Dra. Gisele de Lorena Diniz
Chaves**
Universidade Federal do Santa Catarina
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Produção
Avaliadora Externa



Prof. Dr. Glaydston Mattos Ribeiro
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
de Transportes
Avaliador Externo

Vitória
2022

*Aos meus avós Valdina Menegardo de Lima (in memorian)
e Jair Servare (in memorian), com muito carinho, amor e saudade*

À Kathleen, meu amor!

Agradecimentos

Agradeço à Deus, que a cada dia vejo o seu reflexo em forma de amor. Agradeço aos meus pais, meus maiores incentivadores, que em todo momento dessa caminhada me deram todo apoio em atingir esse objetivo, mesmo que em alguns dias a chegada parecia estar mais longe. Te agradeço, mãe, a professora que começou todo esse processo e minha grande inspiração e, pai, meu herói por todos os ensinamentos pra chegar aqui.

Não posso deixar de agradecer à minha irmã Anne, provavelmente a pessoa no mundo que mais esteve ao meu lado, mesmo fisicamente distante sempre esteve lá quando precisei, você me orgulha demais e é uma super mãe pra nossa Clarinha, minha pequena! Agradeço à Kathleen, minha princesa, inspiração e razão dos meus melhores sorrisos, por toda parceria de sempre e toda paciência e carinho nessa reta final. Agradeço à pequena Alice, por me proporcionar momentos tão leves e doces. Ninguém no mundo é mais sortudo do que eu por ter vocês na minha vida.

Durante essa última fase tive duas grandes perdas que levaram parte de mim, meus avós Jair Servare (*in memoriam*) e Valdina Menegardo de Lima (*in memoriam*) não puderam estar aqui pra acompanhar esse dia, e cada um, do seu jeito, moveria o mundo pra que eu pudesse estar aqui. Vô, você foi meu grande amigo, companheiro e mentor, queria tanto que pudesse ler isso, mas eu sei que estou aqui por você ter acreditado tanto em mim, por ter aprendido e me divertido tanto com você, por tanta coisa parecida, tantas paixões compartilhadas e tantas brincadeiras e piadas que vivemos juntos. Você foi um homem gigante e te agradeço por tudo que fez pra mim.

Vózinha, a dor de te perder foi a maior que senti na minha vida. Em um arquivo antigo que comecei a escrever a tese quando ela ainda estava entre nós eu tinha escrito: "*Vovó Valdina, talvez seja o agradecimento que não consiga expressar em palavras, já que não tem como descrever o maior coração que eu já conheci. Vovó, obrigado por toda a paciência, toda companhia e todo esse amor sem limites que você sempre me deu, você é maravilhosa e toda vez que estou com você eu sempre me sinto em casa e na minha melhor versão.*", hoje você não está mais aqui, mas é certo vou te carregar pra sempre comigo, vózinha!

Agradeço aos meus avós, Antônio Ângelo de Lima e Aurizé de Jesus Servare, vocês são muito especiais para mim. Agradeço a todos os meus tios e primos, dos mais presentes aos mais distantes. Agradeço aos meus primos-irmãos que sempre estiveram lá, amo vocês Ravena, Gadernal, Gabriels, Fernando e Tassi.

Agradeço a todos os amigos que fizeram parte dessa caminhada e a cada dia cresce minha admiração por vocês: Renan, Atainara, Augusto, Eliza e Lorena. Agradeço à

Produshow, quem diria que um de nós viraria doutor em alguma coisa, vocês são parte disso.

Agradeço aos meus orientadores ao longo dessa trajetória, professores Glaydston e Gisele na minha Iniciação Científica, e Glaydston por me fazer me encantar com a Pesquisa Operacional desde a primeira aula que tive. Agradeço ao professor Gilson que foi um grande amigo e orientador e à professora Patrícia que abriu as portas para o mestrado e todas as oportunidades que vieram depois disso sempre mostrando o caminho com carinho, conselhos e orientações, a Professora Marcia que contribuiu na minha formação na graduação, no mestrado e agora no doutorado.

Agradeço por cada orientação recebida, pela paciência e incentivo aos meus orientadores Helder, José Leandro e Sylvain. Agradeço aos comentários valiosos dos membros da banca, que todos tiveram sua importância nessa caminhada para essa defesa.

Agradeço à FAPES e à CAPES pelas bolsas. Agradeço a HEC-Montréal e GERAD pelas oportunidades recebidas. Agradeço à Universidade Federal do Espírito Santo, que me formou o profissional que sou, que faz parte da minha vida e é a instituição referência que sempre vou carregar comigo.

Agradeço ao Centro Universitário Salesiano - UniSales por todo aprendizado e portas abertas nesse último ano, agradeço a cada aluno e colega de trabalho que tornaram essa jornada tão gratificante.

Enfim, pra cada um de vocês que é parte dessa caminhada, “Essa eu fiz pra vocês...”!

*"Fui com a mochila nas costas sem saber o quanto custa
A fé foi minha aposta e toda aposta às vezes frustra
A direção oposta até hoje me assusta
É que eu queria uma resposta e minha resposta foi a busca."
(César MC)*

Resumo

Nesta Tese propõe-se um modelo de programação linear inteira mista (MILP) e dois modelos de programação não linear inteira mista (MINLP) para fazer o planejamento do fluxo de material de um pátio de estocagem num terminal portuário, visando a minimização do consumo de energia elétrica. Os modelos propostos são resolvidos por um solver comercial, usando a heurística baseada em Relaxação Linear (LBRH) e a heurística baseada em Horizonte de Rolagem (HR). O primeiro modelo é resolvido pelo algoritmo LRBH para otimizar o consumo de energia de um sistema pátio-porto de pequeno porte, operando em longo prazo (mais que 60 dias) e com múltiplos produtos. Os outros dois são resolvidos pelo algoritmo HR para otimizar o consumo de energia de um sistema pátio-porto de grande porte no horizonte de curto prazo (24 horas), com múltiplos produtos, diferentes fornecedores de energia e a possibilidade de usar um banco de baterias. Além disso, consideram-se incertezas operacionais nos pátios de grande porte e que as decisões são realizadas em tempo real (a cada hora). Estas heurísticas permitirão ao gestor de energia encontrar soluções que reduzam os custos de energia em pátios de minério de ferro com terminais portuários, para instâncias de grande porte, ou seja, onde não é possível obter uma solução ótima resolvendo os modelos MILP e MINLP. Usando simulações numéricas, realizam-se comparações entre as soluções ótimas, obtidas pelos modelos MILP e MINLP, e aproximadas, obtidas pelas heurísticas LBRH e HR para algumas instâncias de pequeno e médio porte. Nestas instâncias, o LRBH fornece soluções viáveis com uma distância média da função objetivo em relação à solução ótima, isto é, um *gap*, de 3,99% e a abordagem usando a heurística baseada em HR fornece soluções viáveis com um *gap* de 3,21%. Nas instâncias de grande porte, as soluções obtidas com as heurísticas propostas possuem um tempo computacional acessível. Nestas instâncias, o modelo proposto com baterias resolvido com o algoritmo HR, proporciona uma redução de custo de energia de até 17,8 %.

Palavras-chave: Gerenciamento Energético de Pátio de Minério de Ferro, Heurística Baseada em Relaxação Linear, Horizonte de Rolagem, Planejamento e Sequenciamento da Produção, Programação Matemática.

Abstract

In this Thesis, a mixed integer linear programming (MILP) model and two mixed integer nonlinear programming (MINLP) models are proposed to plan the material flow of a stockyard in a port terminal, aiming to minimize the power consumption. The proposed models are solved by a commercial solver, using the Heuristic Based on Linear Relaxation (LBRH) and the heuristic based on Rolling Horizon. The first model is solved by the LRBH algorithm to optimize the power consumption of the small stockyard-port system, operating in the long term (more than 60 days) and with multiple products. The other two are solved by the Rolling Horizon algorithm to optimize the power consumption of the large stockyard-port system in the short-term horizon (24 hours), with multiple products, different powersuppliers and the possibility of using a battery bank. In addition, operational uncertainties in large stockyards are considered and that decisions are made in real time (hourly). These heuristics will allow to the planner to find solutions that reduce power costs in iron ore stockyards in port terminals for large instances, that is, where it is not possible to obtain an optimal solution by solving the MILP and MINLP models. Using numerical simulations, comparisons are made between the optimal solutions, obtained by the MILP and MINLP models, and approximate solutions, obtained by the LBRH and Horizon Rolling heuristics for some small and medium-sized instances. In these instances, LRBH provides viable solutions with an average distance from the objective function of 3.99% in relation to the optimal solution (*gap*) and the approach using the Horizon Rolling based heuristic provides viable solutions with a *gap* of 3.21%. In large instances, the solutions obtained with the proposed heuristics have an accessible computational time. In these instances, the proposed model with batteries solved with the HR algorithm, provides an energy cost reduction of up to 17.8%.

Keywords: Iron Ore Stockyard Energy Management, Linear Relaxation-Based Heuristic, Rolling horizon, Scheduling, Mathematical programming.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ilustração do problema <i>IOSEP</i> estudado nesta tese.	30
Figura 2 – Aparições e relações entre as palavras-chave dos trabalhos estudados no fragmento de literatura estudado.	31
Figura 3 – Representação do sistema pátio-porto de minério de ferro	35
Figura 4 – Rotas do sistema pátio-porto ligando a recepção ao pátio ou a recepção ao porto e o pátio ao porto.	36
Figura 5 – Equipamentos compartilhados pelas rotas 1 e 2 (correia transportadora) e 1 e 3 (carregador de navio).	37
Figura 6 – Fluxograma que representa a estrutura da Heurística baseada em relaxação linear (¹ a maior variável sem um produto designado para pátio, e; ² a variável deve ser maior que 0).	49
Figura 7 – Como funciona o processo de definição da maior variável menor que o limite.	50
Figura 8 – Estrutura do algoritmo de horizonte de rolagem.	52
Figura 9 – Relação entre custo de energia e utilização do Pátio 1 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b) da solução ótima do <i>IOSEP</i> para instância 1.1, onde MF=minério de ferro	62
Figura 10 – Custo de energia e utilização do pátio 2 pelo produto 1, fornecidos pela solução ótima do <i>IOSEP</i> para instância 1.1, onde MF=minério de ferro	63
Figura 11 – Valores atribuídos às variáveis binárias da solução ótima do <i>IOSEP</i> para a Instância 1.1. Quando o produto 1 é designado para estoque, a variável binária é representada em azul, caso contrário, se o produto 2 é designado para estoque, a variável binária é representado em vermelho.	63
Figura 12 – Custo de energia da solução ótima do problema <i>IOSEP</i> para cada instância.	64
Figura 13 – Custos de energia fornecidos pelas soluções ótima e sub-ótima do <i>IOSEP</i>	66
Figura 14 – Definição do valor 1 das variáveis relaxadas após a primeira rodada do modelo LP. Os círculos verdes são a variável definida como 1, porque são maiores que o limite (0,7), e o círculo preto é a variável que será definida como 1 porque é a maior variável abaixo do limite.	67
Figura 15 – Após atribuir o valor 1 a algumas variáveis, houve outra rodada de LP com as alterações, encontrando uma possível solução para este <i>IOSEP</i> . Quando o produto 1 é designado para estoque, a variável é representada em azul, caso contrário, se o produto 2 é designado para estoque, a variável é representada em vermelho.	68

Figura 16 – Relação entre custo de energia e utilização do pátio 1 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b), da solução sub-ótima do <i>IOSEP</i> na Instância 1.1, onde MF=minério de ferro.	69
Figura 17 – Relação entre custo de energia e utilização do pátio 2 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b), da solução sub-ótima do <i>IOSEP</i> na Instância 1.1, onde MF=minério de ferro.	70
Figura 18 – <i>gaps</i> obtidos entre as funções objetivo fornecidas pelo MILP, LP e LRBH para o <i>IOSEP</i> nas instâncias 1.1 a 1.15 em (a) e com o detalhamento das Instâncias 1.10 a 1.15 em (b).	72
Figura 19 – Preço de venda de energia do Fornecedor 1 (a), Fornecedor 2 (b) e Fornecedor 3 (c) do pátio-porto de grande porte ao longo do HPI de 24 hs.	74
Figura 20 – Matriz energética do pátio-porto de grande porte ao longo do HPI de 24 hs.	75
Figura 21 – Matriz energética obtida pela solução ótima do <i>IOSEPmes</i> na Instância 2.15.	77
Figura 22 – Matriz energética obtida pela solução ótima do <i>IOSEPmes</i> na Instância 2.19.	78
Figura 23 – Total de minério transportado no pátio-porto de grande porte fornecido pela solução ótima do <i>IOSEPmes</i> na Instância 2.19.	79
Figura 24 – Total de minério no pátio-porto de grande porte obtido pela solução ótima do <i>IOSEPmes</i> na Instância 2.19.	80
Figura 25 – Matriz energética obtida pela solução ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.15.	82
Figura 26 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução ótima <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.15.	83
Figura 27 – Matriz energética obtida pela solução ótima do problema <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.19.	84
Figura 28 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.19.	84
Figura 29 – Economia de energia no sistema pátio-porto de grande porte fornecida pela solução ótima do problema <i>IOSEPmesb</i>	85
Figura 30 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.21.	89
Figura 31 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.22.	90
Figura 32 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.23.	90

Figura 33 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.24.	91
Figura 34 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.25.	92
Figura 35 – Fluxo de minério transportado no pátio-porto de grande porte fornecido pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.25.	93
Figura 36 – Ocupação do pátio-porto de grande porte fornecido pela solução sub-ótima do <i>IOSEPmesb</i> na Instância 2.25.	93

Lista de tabelas

Tabela 1 – Resumo dos artigos revisados	27
Tabela 2 – Características do modelo <i>IOSEP</i> multiproduto.	40
Tabela 3 – Características principais do modelo <i>IOSEPmes</i>	42
Tabela 4 – Características principais do modelo <i>IOSEPmesb</i>	44
Tabela 5 – Características físicas do pátio-porto de pequeno porte.	57
Tabela 6 – Parâmetros do modelo <i>IOSEP</i> para o pátio-porto de pequeno porte . .	57
Tabela 7 – Instâncias do <i>IOSEP</i> usadas na simulação do pátio-porto de pequeno porte.	58
Tabela 8 – Características físicas do sistema pátio-porto de grande porte.	59
Tabela 9 – Parâmetros dos modelos <i>IOSEPmes</i> e <i>IOSEPmesb</i> para o pátio-porto de grande porte.	59
Tabela 10 – Instâncias dos modelos <i>IOSEPmes</i> e <i>IOSEPmesb</i> usadas na simulação do pátio-porto de grande porte.	60
Tabela 11 – Função objetivo e tempo de processamento da solução ótima do <i>IOSEP</i>	61
Tabela 12 – Função objetivo e tempo de processamento da solução sub-ótima do <i>IOSEP</i>	65
Tabela 13 – Distância (<i>gap</i>) entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema <i>IOSEP</i>	66
Tabela 14 – Distância entre os custos ótimo e sub-ótimo do problema <i>IOSEP</i>	71
Tabela 15 – Função objetivo e tempo de processamento das instâncias do <i>IOSEPmes</i> .	76
Tabela 16 – Custo ótimo e tempo de processamento das instâncias do <i>IOSEPmesb</i> .	81
Tabela 17 – <i>gaps</i> entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema <i>IOSEPmes</i> . . .	87
Tabela 18 – <i>gaps</i> entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema <i>IOSEPmesb</i> . .	87
Tabela 19 – Comparação das funções objetivos dos problemas <i>IOSEPmes</i> e <i>IOSEP-</i> <i>mesb</i> , usando a heurística baseada em HR com HPl de 24 horas	88
Tabela 20 – Economia de energia no sistema pátio-porto de grande porte fornecida pela solução sub-ótima do problema <i>IOSEPmesb</i>	88

Nomenclatura

Conjuntos

T Conjunto de Períodos.

P Conjunto de Produtos.

M Conjunto de Equipamentos.

S Conjunto de subáreas de armazenagem.

N Conjunto de berços disponíveis.

F Conjunto de fornecedores de energia.

R Conjunto de rotas.

R^x Conjunto de rotas (recepção/pátio).

R^y Conjunto de rotas (recepção/pier).

R^z Conjunto de rotas (pátio/pier).

R_s^x Subconjunto de Rotas $r \in R^x$ que alcançam a sub-área s .

R_s^y Subconjunto de Rotas $r \in R^y$ que alcançam a sub-área s .

R_n^y Subconjunto de Rotas $r \in R^y$ que alcançam o pier n .

R_n^z Subconjunto de Rotas $r \in R^z$ que alcançam o pier n .

R_m^x Subconjunto de Rotas x que usam o equipamento m .

R_m^y Subconjunto de Rotas y que usam o equipamento m .

R_m^z Subconjunto de Rotas z que usam o equipamento m .

Parâmetros

C_t^f Custo da utilização da energia vinda do fornecedor de energia f no período de planejamento t .

D_t^f Quantidade de energia disponível do fornecedor de energia f no período de planejamento t .

Ce_t^r Custo de energia de usar a rota r no período t .

Cs_{pt}^s Custo de energia de manter na sub-área de armazenagem do pátio s o produto p no período t .

Cir_{pt} Custo de energia de não atender o fornecimento e manter o produto p na recepção no período t .

Er^{rx} Energia gasta para usar a rota $r \in R^x$.

E_r^{ry} Energia gasta para usar a rota $r \in R^y$.

E_r^{rz} Energia gasta para usar a rota $r \in R^z$.

$E_{c_{pp'}}$ Energia associado com a transformação do produto p' no produto p para atender a demanda de p .

$\beta_{pp'}$ Custo de energia associado com a transformação do produto p' no produto p para atender a demanda de p .

Ce_t^r Custo de energia para usar a rota r no período t ;

Cs_{pt}^s Custo de energia para manter o produto p estocado na sub-área s do patio durante o período t ;

Cir_{pt} Custo de energia para não atender a demanda e manter o produto p na recepção do sistema no período t ;

Es^s Energia gasta para manter o produto estocado na subárea s do patio durante o período t .

Eir Energia gasta para não atender a demanda e manter o produto p na recepção do sistema no período t .

c^{rx} Capacidade (em tons/hora) da rota $r \in R^x$.

c^{ry} Capacidade (em tons/hora) da rota $r \in R^y$.

c^{rz} Capacidade (em tons/hora) da rota $r \in R^z$.

$Capb$ Capacidade de carga máxima da bateria.

j_t^m Tempo disponível (em horas) para o uso do equipamento m no período t .

b^m Capacidade do equipamento m (em tons/hora).

a_{pt} Produção na mina do produto p no período t .

d_{npt} Demanda do produto p do navio ancorado no berço n no período t .

l_{pt}^s Capacidade de armazenagem da sub-área s do produto p no período t .

E_{p0}^s Quantidade do produto p na sub-área s no período 0.

R_{p0} Quantidade do produto p na recepção no período 0.

B_0 Quantidade de carga elétrica armazenada na bateria no período 0.

Variáveis

X_{pt}^r Tempo gasto no período t para transportar o produto p da recepção do sistema usando a rota $r \in R^x$.

$Y_{p'pt}^r$ Tempo gasto para transportar o produto p' para atender a demanda do produto p no

período t usando a rota $r \in R^y$. Quando $p' = p$, o produto não passou por alteração para atender a demanda.

Z_{ppt}^r Tempo gasto para transportar o produto p' tpara atender a demanda do produto p no período t usando a rota $r \in R^z$. Quando $p' = p$, o produto não passou por alteração para atender a demanda.

IR_{pt} Quantidade de produto p na recepção do sistema pátio-porto que não foi descarregado até o final do período t .

e_{pt}^s Quantidade de produto p armazenada na subárea s do pátio no período t .

b_t Quantidade de carga total armazenada na bateria no período t .

U_t Total de energia consumida pelo sistema no período t .

Q_t Quantidade de energia carregada na bateria período t .

W_t^f Variável binária que indica que o sistema elétrico do pátio-porto está recebendo energia do fornecedor f ($W_t^f = 1$) ou não ($W_t^f = 0$) no período t .

f_{pt}^s Variável binária que indica que a sub-área s do pátio está alocada ($f_{pt}^s = 1$) ou não ($f_{pt}^s = 0$) com uma pilha do produto p no período t .

On_t Variável binária que indica quando a bateria está descarregando energia ($On_t = 1$) ou não ($On_t = 0$) no período t .

Off_t Variável binária que indica quando a bateria está carregando energia ($Off_t = 1$) ou não ($Off_t = 0$) no período t .

Lista de abreviaturas e siglas

SPr	Único Produto
Mpr	Multi Produto
SP	Único Período
MP	Multi Período
D	Determinístico
I	Estocástico
CF	Fluxo com Capacidade
UCF	Fluxo sem Capacidade
Ca	Sistema com Capacidade
Uca	Sistema sem Capacidade
Ses	Único Fornecedor de Energia
Mes	Múltiplo Fornecedor de Energia
LP	Programação Linear
MILP	Programação Linear Inteira Mista
MINLP	Programação Não Linear Inteira Mista
MIP	Programação Inteira Mista
SMIP	Programação Estocástica Inteira Mista
Age	Minimização da Idade Média das Pilhas
Cost	Minimização do custo total
Del	Minimização do atraso
Dev	Minimização do desvio padrão
Etime	Minimização da soma do tempo final de recuperação
Pen	Minimização das penalidades

Ships	Maximização do número de navios atendidos
ETime	Minimização do tempo final de recuperação
Wait	Minimização do tempo de espera dos trens carregados
Energy	Minimização dos custos total de energia
CAP	Algoritmo de planejamento de montagem de carga
CG	Geração de Colunas
GA	Algoritmo Genético
GH	Heurística Gulosa
HR	Horizonte de Rolagem
HLBR	Heurística baseada em relaxação linear
CPSs	Cyber-Physical Systems
FO	Função Objetivo
HBRL	Heurística Baseada em Relaxação Linear
HC	Horizonte de Controle
HPI	Horizonte de Planejamento
HP	Horizonte de Predição
HR	Horizonte de Rolagem
<i>IOSEP</i>	Iron Ore Stockyard Energy Management Problem
<i>IOSEPmes</i>	Iron Ore Stockyard Energy Management Problem with multiple energy suppliers
<i>IOSEPmesb</i>	Iron Ore Stockyard Energy Management Problem with multiple energy suppliers and battery
IoT	Internet of Things
IP	Integer Programming
LP	Linear Programming
MF	Minério de Ferro
MILP	Mixed Integer Linear Programming

MINLP	Mixed Integer Non Linear Programming
PPA	Power Purchasing Agreements
REC	Renewable Energy Certificates
S.I.	Sistema Internacional
SOC	State of Charge

Sumário

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Estado da arte sobre o planejamento do sistema pátio-porto	25
1.2	Contribuições da Tese	31
1.3	Objetivos	32
1.3.1	Objetivo geral	32
1.3.2	Objetivos específicos	32
1.4	Produção relacionada a esta tese	33
1.4.1	Artigos completos publicados em periódicos	33
1.4.2	Artigos completos submetidos a periódicos	33
1.4.3	Capítulo de Livro publicado	33
1.4.4	Artigos Completos Publicados em Anais de Congresso	33
1.4.5	Resumo Expandido Publicado em Anais de Congresso	34
1.5	Estrutura do trabalho	34
2	O PROBLEMA DE GERENCIAMENTO ENERGÉTICO DO PÁTIO-PORTO DE MINÉRIO DE FERRO	35
2.1	Definição do problema	35
2.2	Formulação do problema de gerenciamento energético do pátio-porto com multiprodutos (<i>IOSEP</i>)	37
2.3	Formulação do problema <i>IOSEP</i> com múltiplos fornecedores de energia (<i>IOSEPmes</i>)	40
2.4	Formulação do problema <i>IOSEP</i> com múltiplos fornecedores de energia e bateria (<i>IOSEPmesb</i>)	43
2.5	Linearização dos modelos MINLP	44
3	HEURÍSTICAS PROPOSTAS	48
3.1	Heurística baseada em relaxação linear	48
3.2	Heurística baseada em Horizonte de Rolagem	51
4	RESULTADOS COMPUTACIONAIS E DISCUSSÕES	56
4.1	Características físicas do sistema pátio-porto de minério de ferro	56
4.1.1	Características do pátio-porto de pequeno porte	57
4.1.2	Características do pátio-porto de grande porte	58
4.2	Simulações do pátio de pequeno porte	60
4.2.1	Soluções ótimas do <i>IOSEP</i>	60
4.2.2	Soluções sub-ótimas do <i>IOSEP</i> usando o algoritmo LRBH	64

4.3	Simulações do pátio de grande porte	73
4.3.1	Soluções ótimas do <i>IOSEPmes</i>	75
4.3.2	Soluções ótimas do <i>IOSEPmesb</i>	80
4.3.3	Soluções sub-ótimas do <i>IOSEPmes</i> e o <i>IOSEPmesb</i> usando a heurística baseada no HR	86
4.3.3.1	Simulações do <i>IOSEPmes</i> e o <i>IOSEPmesb</i> com falhas nos equipamentos	87
5	CONCLUSÃO	95
5.1	Trabalhos futuros	97
	REFERÊNCIAS	98

1 Introdução

O gerenciamento de energia inclui planejamento e operação de unidades de produção e consumo de energia, bem como distribuição e armazenamento de energia. Está intimamente ligada à gestão ambiental, gestão da produção e logística. Ao formular uma estratégia energética, seja de curto, médio ou longo prazo, as empresas têm a oportunidade de evitar riscos e garantir um avanço competitivo em relação aos seus rivais de negócios (WIKIPEDIA, 2022).

A eficiência energética nas várias etapas da cadeia de suprimento em grande escala, compreendendo a aquisição de matérias primas, a fabricação, o armazenamento e a distribuição dos produtos, é uma preocupação essencial nos dias atuais, devido aos efeitos do aquecimento global e aumento do preço internacional dos combustíveis fósseis (HARALDSSON; JOHANSSON, 2019). Em países cuja fonte principal de energia elétrica é baseada em recursos hídricos, como o Brasil por exemplo, observa-se que a falta frequente de chuvas em longos períodos nestes últimos anos, vem diminuindo o nível do reservatórios, provocando aumento do preço da energia elétrica e consequentemente aumento de custos de produção e prejuízos econômicos (ROSALES et al., 2021).

O modelo energético na maior parte das cadeias produtivas é ineficiente devido a centralidade na aquisição de energia elétrica de grandes produtores interligados ao sistema de energia da concessionária (ROCHA et al., 2021). Uma estratégia usada para diminuir os custos energéticos da cadeia de suprimentos é comprar a energia de outros produtores de energia além da concessionária, como produtores independentes de energia renovável (KHALAF; WANG, 2018) e auto produtores industriais que geram excedente de energia, como na indústria siderúrgica (OLIVEIRA JUNIOR; PENA; SALLES, 2016).

Assim, a energia pode ser adquirida do produtor que fornecer energia no menor preço e, ainda, armazenada em baterias para ser consumida quando o preço de energia da concessionária estiver mais elevado. Existem outras estratégias que podem ser usadas para diminuir o consumo de eletricidade da cadeia de suprimento, como a utilização de tecnologia da indústria 4.0 para monitoramento e controle do consumo de energia de equipamentos elétricos usados na movimentação e fabricação de produtos (NOTA et al., 2020), uso de técnicas de otimização do consumo de energia para o transporte de produtos entre os centros de distribuição e centros de armazenamento (CORLU et al., 2020), planejamento da operação das máquinas do chão de fábrica visando o menor consumo de energia (*energy-aware production scheduling*) (MOON; SHIN; PARK, 2013), entre outras. Tais estratégias de otimização do consumo de energia elétrica tem sido amplamente investigadas na indústria de manufatura (KARIMI; KWON, 2021).

Um elo essencial na cadeia logística da indústria de mineração é o sistema pátio-porto, que se destaca como um gargalo e influencia significativamente no desempenho da cadeia logística (KOCH; MEHENDIRATTA, 2016). Recentemente, as mineradoras estão aumentando a participação das energias renováveis em suas operações. Geralmente, isso é alcançado por meio de Contratos de Compra de Energia (PPAs, do inglês *Power Purchasing Agreements*) ou *joint ventures* com fornecedores de energia, comprando certificados de energia renovável (RECs, do inglês *Renewable Energy Certificates*) ou por meio da própria microrrede da mineradora (BAZ, 2021).

Para minimizar o custo de aquisição de energia de diferentes fornecedores e da microrrede, é necessário um sistema de gerenciamento de energia que avalie a carga/descarga do banco de baterias durante as operações em tempo real (de poucos minutos a uma hora), a curva horária do preço da energia e a curva de demanda horária (MOON; SHIN; PARK, 2013; GIMELLI et al., 2019), que estão fortemente relacionados com a complexidade operacional da cadeia logística. Ainda, há um grande potencial de pesquisas na gestão inteligente de energia de microrredes em portos. Assim, esta Tese tem como objetivo explorar este assunto, propondo algoritmos que realizam a otimização da energia elétrica consumida num sistema pátio-porto de minério de ferro, considerando a possibilidade de comprar energia de vários fornecedores e/ ou armazená-la em baterias para um futuro consumo (IRIS; LAM, 2019).

1.1 Estado da arte sobre o planejamento do sistema pátio-porto

O sistema pátio-porto da indústria de mineração recebe as matérias-primas transportadas por trem, e as armazena em pilhas até os navios chegarem aos portos. Os principais processos considerados no planejamento pátio-porto são a chegada dos vagões aos viradores de vagões, as rotas que auxiliam no empilhamento e recuperação do minério, o processo de empilhamento e recuperação e o carregamento dos navios.

Portanto, a eficiência operacional do sistema pátio-porto exige que o escoamento do minério em cada um desses processos seja realizado de forma rápida, sem interrupção ao mesmo tempo em que os navios são carregados com a quantidade e qualidade de minério solicitada pelos clientes.

Além disso, os operadores de terminais preferem operações econômicas em vez da alternativa dispendiosa e a estratégia de operação tradicional baseada na experiência geralmente é insuficiente para lidar com a crescente demanda e operações mais complexas (TANG; JIN; SHI, 2022).

Para atingir este objetivo, diversos trabalhos sobre planejamento do sistema pátio-porto utilizando técnicas de otimização determinística foram propostos na última década. Por exemplo, (AGO; NISHI; KONISHI, 2007) trabalhou em um modelo de Programação

Linear Inteira Mista (MILP, do inglês *Mixed Integer Linear Programming*) com decomposição Lagrangiana e técnica de coordenação para otimizar simultaneamente a alocação de armazenamento e o roteamento de transporte no pátio de matérias-primas. Os trabalhos de (BOLAND; GULCZYNSKI; SAVELSBERGH, 2012) e (BOLAND et al., 2011) propuseram modelo de programação inteira com construção gulosa para otimizar o gerenciamento do pátio de estocagem, enquanto (HANOUN et al., 2013) formulou um modelo bi-objetivo para planejamento de pátio com escalonamento de recursos.

(BELOV et al., 2014) e (BELOV et al., 2015) introduziram um modelo de Programação de Restrições com busca de grandes vizinhanças para otimizar o planejamento do pátio de estocagem, considerando a programação de recuperadores e chegadas de navios. Um algoritmo de árvore de busca foi proposto por (SAVELSBERGH; SMITH, 2015a) para planejamento de pátio de estocagem, que faz uso de propriedades geométricas do diagrama espaço-tempo do planejamento de pátio de carvão.

(MENEZES; MATEUS; RAVETTI, 2017) apresentaram uma modelagem matemática para controle do sistema pátio-porto, incluindo recebimento através de sistema de trilhos, equipamentos de pátio, alocação e disponibilidade no porto, considerando as quantidades a serem produzidas, e os preços e demandas, de acordo com o cumprimento das metas definidas por níveis superiores. A técnica utilizada para resolver o problema foi a geração de colunas com branch-and-price.

(SAVELSBERGH; SMITH, 2015b) propuseram várias variantes de modelos MILP para otimizar uma versão combinada de programação de produção de mina a céu aberto com planejamento de pátio de estocagem. Modelos de simulação de eventos discretos aplicados no planejamento pátio-porto podem ser encontrados em (LE et al., 2014), que avaliou o valor de diferentes planos de produção em relação a alguma função de desempenho de interesse.

Além disso, (XIAO-PING; YU-HONG; YA-NAN, 2015) mostraram um modelo de simulação do sistema de rede de transportadores de uma mina de superfície na China e (VIANEN; OTTJES; LODIEWIJKS, 2016) realizaram uma simulação de eventos discretos para redesenhar uma rede de transportadores. Por fim, (SERVARE JUNIOR; ROCHA; SALLES, 2020) propuseram um modelo matemático bi-objetivo para maximizar a carga transportada e a quantidade de navios atendidos nos berços durante um horizonte de planejamento definido.

Usando as siglas definidas no pré-texto desta Tese (veja Nomenclature), a Tabela 1 apresenta as principais características dos artigos revisados na literatura sobre planejamento de pátio de estocagem de granéis sólidos. Além disso, esta tabela mostra que os modelos matemáticos mais frequentes são formulados por meio da programação inteira mista (do inglês, *mixed integer programming* - MIP) e MILP.

Tabela 1 – Resumo dos artigos revisados

Artigo	Definição do Problema	Tipo de Pátio	Modelagem Objetivos		Técnicas
(ABDEKHODAE et al., 2004)	MPr, MP, D, CF, UCa, Ses, NBa	Carvão	MIP	Pen	Exato e GH
(BOLAND; GULCZYNSKI; SAVELSBERGH, 2012)	SPr, MP, D, UCF, Ca, Ses, NBa	Carvão	MILP	Del	Exato e GH
(LU, 2010)	SPr, SP, S, CF, Ca, Ses, NBa	Granel Sólido	-	-	Simulação
(HU; YAO, 2012)	SPr, SP, D, UCF, Ca, Ses, NBa	Minério de Ferro	MIP	MS	Exato GA
(VIANEN et al., 2012)	SPr, SP, S, CF, Ca, Ses, NBa	Granel Sólido	-	-	Simulação
(HANOUN et al., 2013)	MPr, MP, D, UCF, Ca, Ses, NBa	Carvão	LP	Del/Age	Exato e Heurística
(BOLAND; SAVELSBERGH; WATERER, 2013)	SPr, MP, D, UCF, UCa, Ses, NBa	Carvão	MINLP	Dev	Exato
(SAVELSBERGH; KAPOOR, 2013)	Mpr, MP, D, CF, Ca, Ses, NBa	Carvão	-	Time	Algoritmo de Aproximação
(VIANEN; OTTJES; LODEWIJKS, 2014)	SPr, SP, S, CF, Ca, Ses, NBa	Granel Sólido	-	-	Simulação
(VIANEN; OTTJES; LODEWIJKS, 2015)	SPr, SP, S, CF, Ca, Ses, NBa	Granel Seco	-	Wait	Simulação
(SAVELSBERGH; SMITH, 2015a)	MPr, SP, D, UCF, Ca, Ses, NBa	Carvão	-	Thro	CAP
(KALINOWSKI; KAPOOR; SAVELSBERGH, 2016)	MPr, SP, D, UCF, UCa, Ses, NBa	Carvão	MIP	Etime	Exato
(MENEZES; MATEUS; RAVETTI, 2017)	MPr, MP, D, CF, Ca, Ses, NBa	Minério de Ferro	MILP	Costs	Exato e CG
(DAFNOMILIS et al., 2018)	SPr, SP, D, UCF, Ca, Ses, NBa	Biomassa	MILP	Costs	Exato
(UNSAI; OGUZ, 2019)	MPr, SP, D, CF, Ca, Ses, NBa	Granel Seco	MILP	Time	Exato
(SERVARE JUNIOR; ROCHA; SALLES, 2020)	MPr, MP, D, CF, Ca, Ses, NBa	Minério de Ferro	MILP	Ships	Exato

Os portos são a espinha dorsal do comércio internacional, proporcionando ligações diretas do transporte internacional para o transporte regional ou local sistemas e cadeias comerciais ([CHEON; DOWALL; SONG, 2010](#)). Diante dos trabalhos já realizados, observa-se a importância do sistema pátio-porto devido ao seu papel estratégico, uma vez que importante elo da cadeia logística a que pertence, influenciando de forma significativa no seu desempenho.

Especificamente no caso de granéis sólidos, como o carvão e o minério de ferro, a alocação das pilhas de produtos ao longo da extensão destes pátios impacta de maneira direta no desempenho dos processos portuários e, de acordo com a gravidade da situação, pode até interromper o processo de fornecimento por um período ([SERVARE JUNIOR; ROCHA; SALLES, 2020](#)). Um navio que venha a ter sua partida atrasada pela ineficiência no processo pode impactar ao sistema logístico uma multa contratual oriunda do proprietário da embarcação ([TANG; SUN; LIU, 2016](#)) ou, ainda, portos ineficientes também aumentam os custos de manuseio, que são um dos componentes dos custos de envio ([CLARK; DOLLAR; MICCO, 2004](#)).

Devido à crescente demanda de minério de ferro, grandes terminais de minério de ferro estão se tornando nós críticos na rede de transporte internacional (TANG; JIN; SHI, 2022). Nesse sentido, portos buscam a eficiência para se tornarem mais competitivos em relação aos portos nas proximidades (BALLIAUW; KORT; ZHANG, 2019). Por outro lado, se a alocação for feita de forma eficiente irá proporcionar maiores fluxos de minério no pátio com menores custos operacionais e, conseqüentemente, haverá um melhor resultado global desta cadeia de suprimentos.

Considera-se, ainda, que este processo não é determinístico, ou seja, ocorrem mudanças operacionais não programadas devido às incertezas que o sistema está sujeito. Dentre fontes que podem gerar incertezas no sistema identificadas por (BALLIAUW et al., 2019) incluem-se a diversidade de atores dessa cadeia logística.

As incertezas do sistema são relacionadas aos imprevistos nos dados de entrada (PENA; OLIVEIRA JUNIOR; SALLES, 2019), podendo ser provocadas por alguma interrupção ou indisponibilidade no funcionamento regular de algum elemento do sistema, tais como a interrupção do fornecimento da matéria prima no pátio até a avaria de algum equipamento, entre outros. Por exemplo, um equipamento que tenha sua disponibilidade afetada por uma manutenção corretiva impacta momentaneamente na utilização deste equipamento ou um navio que tenha atrasado e não possa estar atracado no momento que a sua demanda estava prevista para ser atendida são situações que são consideradas incertezas neste trabalho.

O projeto e a gestão da rede de suprimentos no ambiente de negócios competitivo de hoje é um dos problemas mais importantes e difíceis que os gerentes enfrentam (TSAO, 2013). Ainda, as organizações estão cada vez mais sujeitas a interrupções inesperadas, que afetam cadeias de suprimento inteiras (MUNIR et al., 2020). Um fator essencial neste setor é a disponibilidade do produto no momento adequado para atender os clientes (SERVARE JUNIOR et al., 2020).

Uma mineradora que movimenta tanta carga deve se preocupar com os detalhes do processo para buscar uma distribuição eficiente. Com um alto volume, qualquer economia pode ter um impacto significativo em seu planejamento e resultados de negócios. Para investimentos em grande escala em sistemas de gerenciamento de cadeia de suprimentos existe um risco de falha particularmente alto se não for implementado de forma adequada (SHARIF; IRANI, 2012).

A partir dos trabalhos citados acima sobre planejamento do sistema pátio-porto de minério de ferro (MF), observa-se que a maior preocupação é com a eficiência operacional, considerando como função objetivo o *makespan* (período ocorrendo entre o início e o fim do projeto), a quantidade de navios atendidos, a vazão da produção, o tempo e os custos operacionais do pátio-porto.

Neste ambiente globalizado e competitivo com uma busca incessante para que se tenha melhores resultados, observa-se nos trabalhos supracitados a oportunidade do desenvolvimento de pesquisa considerando a eficiência energética desse sistema. Desse modo, um estudo considerando a diversidade de matrizes energéticas que possam estar disponíveis torna-se um fator essencial na avaliação desse planejamento. A eficiência global será ótima após a escolha da melhor combinação de períodos de uso dos equipamentos de acordo com o preço da energia disponível.

Uma estratégia de gerenciamento de energia importante é a possibilidade de uma organização adquirir energia através da rede de distribuição regular e por meio de auto-produtores e, ainda poder armazenar energia em baterias para consumi-la em momentos de baixa demanda ou quando os custos energéticos são elevados. A escolha da melhor alternativa dependerá de vários fatores, e o principal é o preço de energia ofertado, que varia ao longo do tempo. O gerenciamento desta situação é chamado nesta Tese de problema de gerenciamento energético de pátio de minério de ferro e é apresentado em três versões.

A primeira delas considera o gerenciamento do consumo de energia de um sistema pátio-porto de pequeno porte, capaz de armazenar vários produtos, porém com um fornecedor de energia cujo preço é variável ao longo do tempo, chamado de *IOSEP* (do inglês, *Iron Ore Stockyard Energy Management Problem*).

A segunda é aplicada a um sistema pátio-porto de grande porte, com múltiplos produtos e com múltiplos fornecedores de energia para a rede de distribuição do sistema pátio-porto, como: fontes alternativas limpas, rede de energia local, rede de energia própria e de outras indústrias que fornecem energia de produção própria. Este problema é chamado de *IOSEPmes* (*Iron Ore Stockyard Energy Management Problem with multiplal energy sourcers*).

Por fim, a última proposta desta pesquisa é o problema *IOSEPmesb* (*Iron Ore Stockyard Energy Management Problem with multiplal energy sourcers and battery*), que também será aplicado a um pátio de grande porte. Além das múltiplas fontes de energia, considera-se no *IOSEPmesb* um sistema de baterias que permitirá armazenar energia e usá-la de maneira estratégica para redução do custo total de energia deste sistema. Este banco de bateria receberia energia comprada de outros fornecedores em períodos em que seu nível de carga é baixo e, após ser carregada, a energia estocada poderia ser utilizada ao longo dos períodos em que o preço de energia elétrica ofertada por outras fontes é alto. Esta proposta está ilustrada na Figura 1

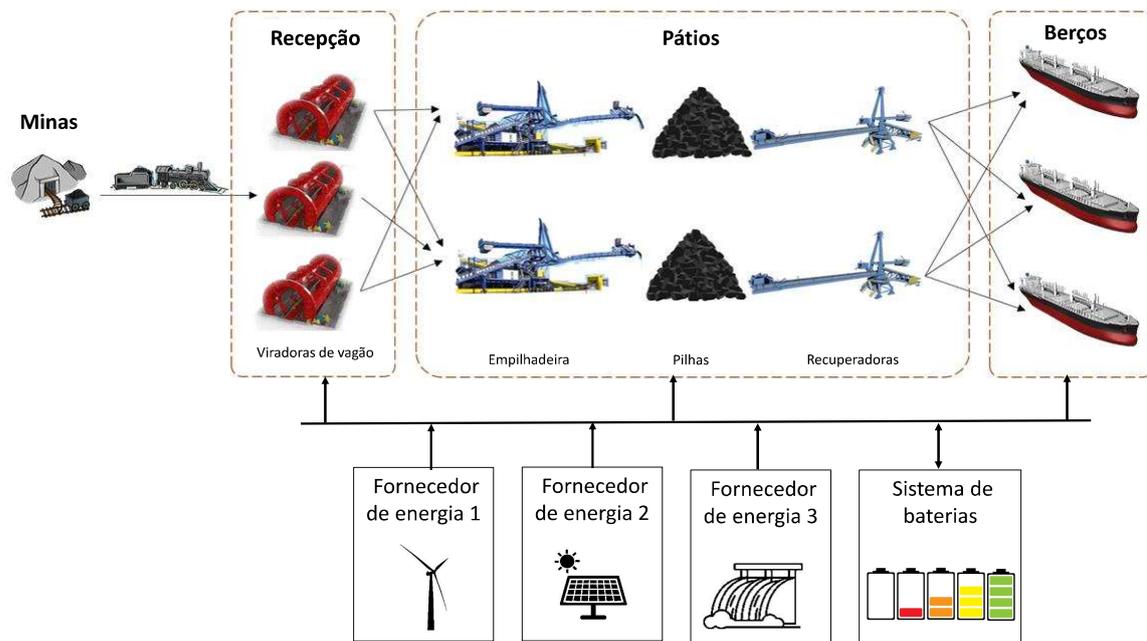


Figura 1 – Ilustração do problema *IOSEP* estudado nesta tese.

A Figura 2 apresenta as relações entre os artigos apresentados na Tabela 1 a partir de suas palavras-chaves, e com isso, destaca-se que apenas as publicações realizadas durante a elaboração desta Tese abordam o problema de gerenciamento da eficiência energético do pátio de minério de ferro com terminal portuário. Esta Tese se relaciona com os demais trabalhos da literatura somente no que diz respeito ao planejamento (*scheduling*) do fluxo de minério, sendo o *IOSEP* e suas variações uma nova fronteira de pesquisa.

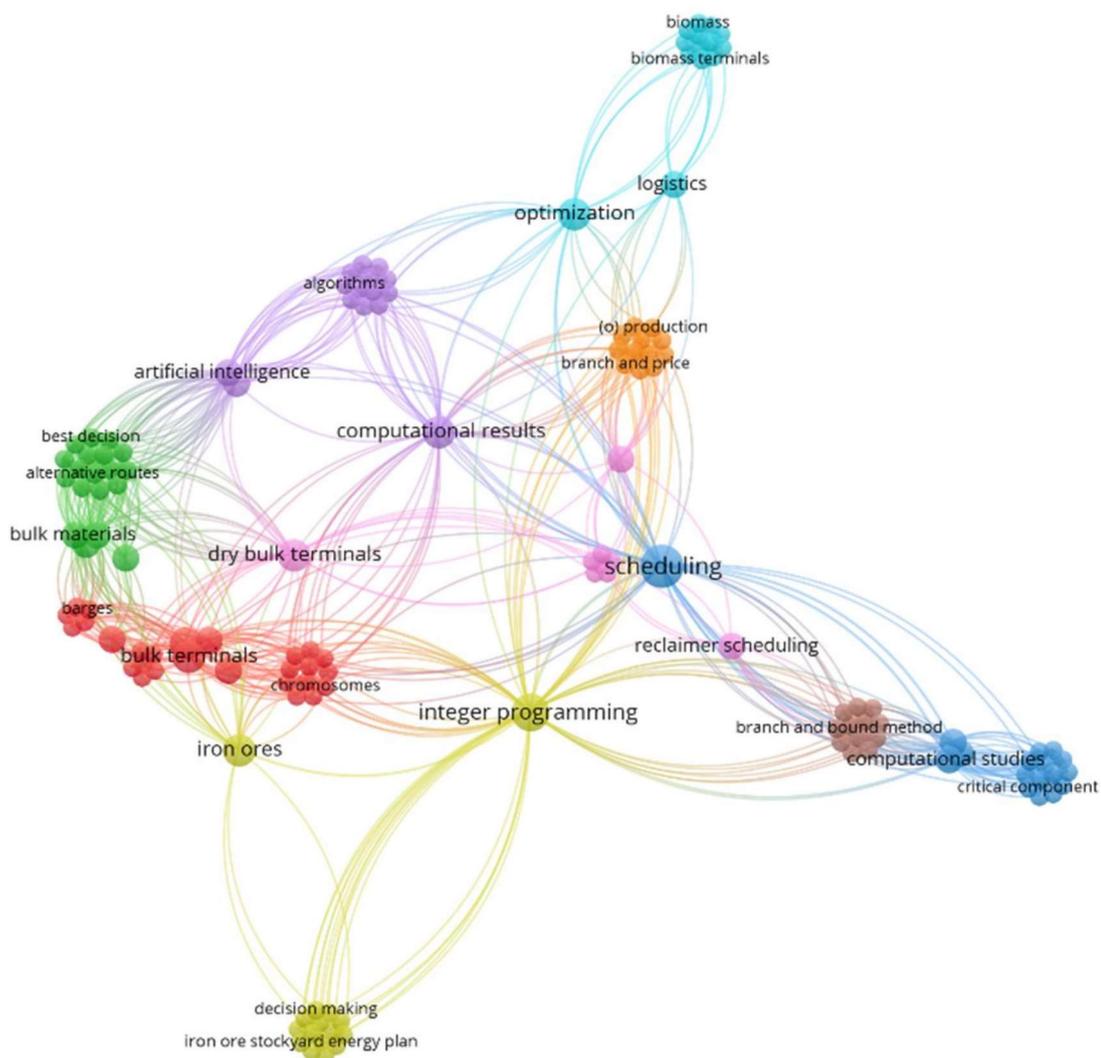


Figura 2 – Aparições e relações entre as palavras-chave dos trabalhos estudados no fragmento de literatura estudado.

1.2 Contribuições da Tese

Esta Tese propõe modelos matemáticos MILP e MINLP para otimizar o gerenciamento de energia elétrica consumida em sistemas pátio-porto de pequeno e grande porte. Este modelos consideram os fluxos de energia elétrica e de material entre os equipamentos e a alocação de diferentes tipos de minério no sistema pátio-porto. Podem incluir também diferentes fornecedores de energia e a possibilidade da utilização de bateria para armazenamento de energia. Portanto, as contribuições deste trabalho são as seguintes:

- (i) Desenvolvimento de um modelo MILP para resolver o problema *IOSEP* aplicado a um sistema pátio-porto de pequeno porte;
- (ii) Desenvolvimento de um modelo MINLP para resolver os problemas *IOSEP_{mes}* e *IOSEP_{mesb}* aplicados a um sistema pátio-porto de grande porte;

(iii) Utilização da heurística baseada em relaxação linear para resolver o problema *IOSEP* em longo prazo aplicado a um sistema pátio-porto de pequeno porte;

(iv) Utilização da heurística baseada em horizonte de rolagem para resolver os problemas *IOSEPmes* e o *IOSEPmesb* em curto prazo com tomadas de decisões em tempo real num sistema pátio-porto de grande porte .

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Propor estratégias de gerenciamento de energia em curto e em longo prazo, aplicados a sistemas pátio- porto de pequeno e grande porte, com múltiplos produtos e que contemplem as seguintes características: a possibilidade de adquirir energia de diferentes fornecedores, de utilizar banco de baterias e de incluir incertezas nos parâmetros dos modelos. Além disso, esta Tese tem como objetivo geral propor heurísticas capazes de resolver estes problemas, quando não é possível obter soluções ótimas.

1.3.2 Objetivos específicos

Com isso, os objetivos específicos deste trabalho são:

- Modelar os processos operacionais envolvidos no pátio de estocagem de pilhas de minério de ferro, e transporte deste produto num terminal portuário;
- Modelar cenários e alternativas de otimização do consumo de energia do sistema pátio-porto, considerando sua operação nos horizontes de curto e longo prazo;
- Determinar os parâmetros e informações dos modelos propostos;
- Produzir instâncias que considerem incertezas nos parâmetros do modelo;
- Desenvolver os modelos MILP e MINLP;
- Implementar a heurística baseada em relaxação linear para um gerenciamento em longo prazo do consumo de energia do sistema pátio-porto de pequeno porte com múltiplos produtos;
- Implementar a heurística baseada em horizonte de rolagem para gerenciamento em curto prazo do consumo de energia do sistema pátio-porto de grande porte, e decisões operacionais em tempo real sob incertezas, com múltiplos produtos, diferentes fornecedores de energia e/ou banco de bateria; e
- Analisar as características das soluções obtidas para os diferentes cenários.

1.4 Produção relacionada a esta tese

Os trabalhos relacionados a esta tese são descritos nessa Seção de acordo com a forma de publicação.

1.4.1 Artigos completos publicados em periódicos

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F.; PERRON, S. A Linear Relaxation-Based Heuristic for Iron Ore Stockyard Energy Planning. *Energies*, 2020, 13.19: 5232.

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F. A multi-product mathematical model for iron ore stockyard planning problem. *Brazilian Journal of Development*, 2020, 6.7: 45076-45089.

1.4.2 Artigos completos submetidos a periódicos

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F. Stockyard-port Energy Planning Using Mixed Integer Non Linear Programming and Horizon Rolling algorithm With Uncertainty. Submetido a revista *Applied Energy* em setembro de 2022.

1.4.3 Capítulo de Livro publicado

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; LOPES, A. D. O.; SALLES, J. L. F.; ROCHA, H. R. O. Modelagem Matemática para o Problema de Alocação de Pilhas em um Pátio de Estocagem e Porto. In: Editora Poisson. (Org.). *Gestão da Produção em Foco*. 1ed. Belo Horizonte: Editora Poisson, 2019, v. 31, p. 194-202.

1.4.4 Artigos Completos Publicados em Anais de Congresso

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F. Modelo matemático multi-produtos para planejamento de alocação de pilha de minério. In: LI Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional, 2019, Limeira. *Anais do 51º Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, 2019.

LOPES, A. D. O.; SERVARE JUNIOR, M. W. J.; SALLES, J. L. F.; ROCHA, H. R. O.; SILVA, J. A. L.; SEGATTO, M. V. Ferramentas de Auxílio ao Planejamento de Curto Prazo para Industrias de Mineração 4.0. In: 13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, 2018, São Paulo. *13th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications*, 2018. p. 2169-2176.

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; LOPES, A. D. O.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F. Modelo matemático para otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem

de portos e carregamento de navios. In: VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2018, Ponta Grossa. Anais do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia de Produção, 2018.

1.4.5 Resumo Expandido Publicado em Anais de Congresso

SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. O.; SALLES, J. L. F. Otimização na alocação pilhas em um pátio de estocagem de portos: modelagem matemática e técnicas de solução. In: XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2018, Gramado. Anais do XXXII Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2018.

1.5 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizada em 5 Seções. Na Seção 1 são apresentados o contexto desta Tese, os trabalhos relacionados na literatura, a produção desenvolvida nesta pesquisa e os objetivos desta Tese. A Seção 2 apresenta o detalhamento dos modelos matemáticos propostos para resolver os problemas de gerenciamento de energia dos sistemas pátio-porto de pequeno e grande porte, considerando variações no preço de venda de energia ao longo do tempo, e a possibilidade de incluir diferentes fornecedores de energia, banco de baterias e incertezas operacionais.

A Seção 3 apresenta as heurísticas para resolver os problemas de planejamento de energia dos sistemas pátio-porto de pequeno porte e grande porte propostos. Os resultados computacionais são discutidos na Seção 4, e as considerações finais são apresentadas na Seção 5.

2 O problema de gerenciamento energético do pátio-porto de minério de ferro

2.1 Definição do problema

No sistema pátio-porto estudado neste trabalho, o minério de ferro é transportado por um conjunto de rotas, interligando os terminais de descarga (recepção) com viradoras, pátios de estocagem e berços de navios. O minério de ferro sai das minas para os terminais de descarga (viradoras), situados na recepção do sistema pátio-porto, por meio de ferrovias. Nesses terminais de descarga, os vagões descarregam seu conteúdo em correias transportadoras para transportar esse material até as empilhadeiras. Estas máquinas depositam o minério em pilhas localizadas em diferentes posições do pátio para armazenamento, conforme mostrado na Figura 3.

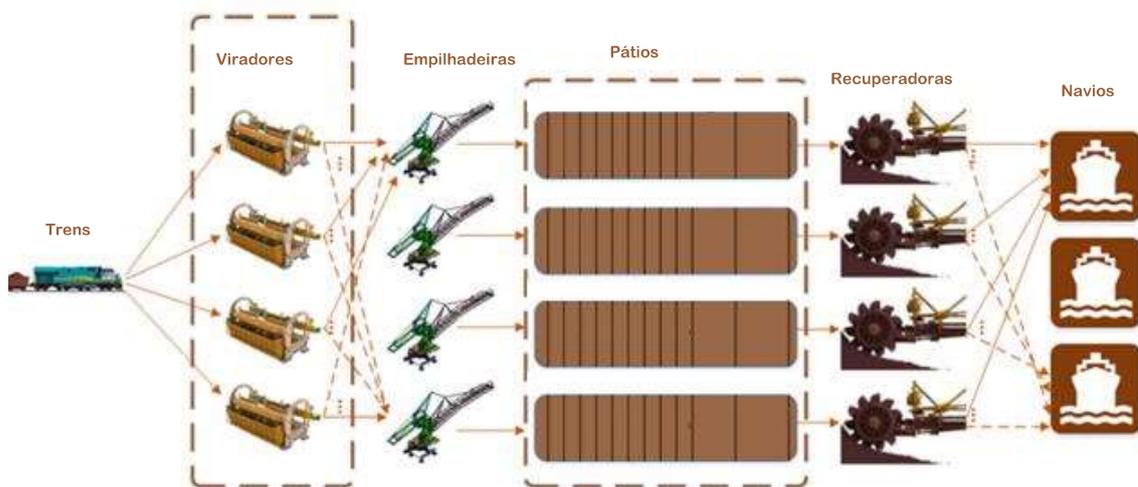


Figura 3 – Representação do sistema pátio-porto de minério de ferro

A construção de todas as pilhas para atender a demanda de um único navio pode levar vários dias. Esses estoques permanecerão em repouso até que o navio chegue ao cais. Quando esse evento ocorre, a recuperadora coloca o minério estocado nas correias transportadoras para enviar este produto imediatamente aos navios. Este estudo considera um conjunto de estoques para cada navio que chega ao cais do porto. Um navio não pode chegar ao cais antes de seu horário previamente estimado. O tempo de carregamento do navio é diretamente proporcional ao equipamento de carregamento e recuperação envolvido.

O presente estudo considera uma variedade de produtos armazenados entre os

estoques, onde cada produto é um tipo de minério de ferro. Esse minério pode ser diferenciado de acordo com os níveis de qualidade e pureza exigidos pelos clientes e, portanto, deve ser alocado em diferentes pilhas do pátio.

A composição de cada produto é feita a partir de uma combinação (ou *blend*) de matéria-prima das pilhas de estoque. Quando o produto não estiver disponível ou for necessário construir o estoque em outra pilha do pátio de estocagem previamente agendada para um produto diferente, haverá penalidades relacionadas ao gasto de transformação de uma qualidade de minério de ferro em outra para atender às demandas.

Outro tipo de penalidade está relacionado ao atraso na descarga do vagão no terminal de recepção. Neste caso, o minério deve permanecer alocado nos vagões que o trouxeram, porém, considera-se que existe um consumo de energia do pátio de manobras para que os vagões estejam lá aguardando a sua vez.

A Figura 4 mostra as diferentes rotas do pátio de estocagem usadas para transportar o minério de ferro até o navio. Equipamentos como empilhadeiras, recuperadoras, correia transportadora e carregador de navio podem compartilhar diferentes rotas. As rotas podem fazer ligação da recepção do sistema com o pátio (R_x), da recepção com os berços (R_y) e dos pátios com os berços (R_z).

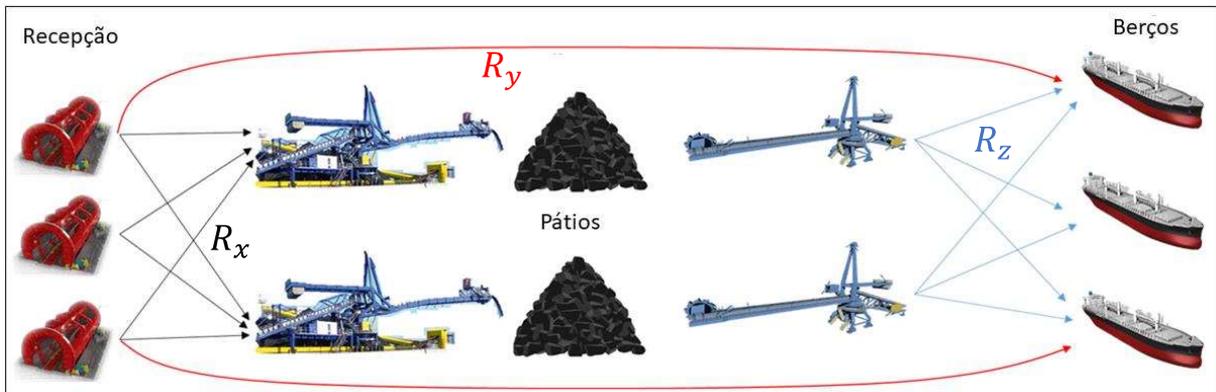


Figura 4 – Rotas do sistema pátio-porto ligando a recepção ao pátio ou a recepção ao porto e o pátio ao porto.

Por exemplo, na Figura 5, a correia transportadora compartilha as rotas 1 e 2, enquanto o carregador de navios no berço é compartilhado pelas rotas 1 e 3.

Empilhadeiras e recuperadoras movem-se livremente para a posição da pilha. Para que as empilhadeiras e recuperadoras funcionem corretamente, elas devem permanecer à distância para evitar colisões. Neste trabalho, a movimentação das empilhadeiras e recuperadoras é considerada sincronizada, desconsiderando qualquer interferência uma da outra em suas operações.



Figura 5 – Equipamentos compartilhados pelas rotas 1 e 2 (correia transportadora) e 1 e 3 (carregador de navio).

Assim, o problema de gerenciamento energético do sistema pátio-porto proposto nesta tese visa determinar os fluxos de material entre os equipamentos ilustrados nas Figuras 3, 4 e 5, com a possibilidade de escolher diferentes fornecedores de energia elétrica, e de utilizar a energia armazenada num banco de baterias no seu sistema de distribuição de eletricidade, afim de minimizar o consumo total de energia.

2.2 Formulação do problema de gerenciamento energético do pátio-porto com multiprodutos (*IOSEP*)

Considere a lista de nomenclaturas definida nesta Tese, e os fluxos de material entre os equipamentos do sistema pátio-porto ilustrados nas Figuras 3, 4 e 5. A seguir descreve-se o modelo *IOSEP* proposto nesta Tese, o qual se baseia na formulação desenvolvida em (MENEZES; MATEUS; RAVETTI, 2017). Estes autores consideram o custo do consumo de energia elétrica no pátio na função objetivo, além de outras componentes, e também fazem a abordagem multiperíodos.

$$\begin{aligned}
 \min \quad & \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^x} C e_t^r X_{pt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^y} C e_t^r Y_{pp't}^r + \\
 & \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^z} C e_t^r Z_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} \sum_{s \in S} C s_{pt}^s e_{pt}^s + \\
 & \sum_{p \in P} \sum_{t \in T} C i r_{pt} I R_{pt} + \sum_{p \in P} \sum_{p' \neq p} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^y} \beta_{pp'} Y_{pp't}^r + \\
 & \sum_{p \in P} \sum_{p' \neq p} \sum_{t \in T} \sum_{r \in R^z} \beta_{pp'} Z_{pp't}^r
 \end{aligned} \tag{2.1}$$

sujeito a:

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{r \in R_m^x} X_{pt}^r + \sum_{r \in R_m^y} \sum_{p' \in P} Y_{p'pt}^r + \sum_{r \in R_m^z} \sum_{p' \in P} Z_{pp't}^r \right) \leq j_t^m \quad (2.2)$$

$$\forall m \in M, t \in T$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{r \in R_m^x} c^{rx} X_{pt}^r + \sum_{r \in R_m^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{p'pt}^r + \sum_{r \in R_m^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{pp't}^r \right) \leq b^m j_t^m \quad (2.3)$$

$$\forall m \in M, t \in T$$

$$\sum_{r \in R^x} c^{rx} X_{pt}^r + \sum_{r \in R^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{p'pt}^r + (IR_{pt} - IR_{p(t-1)}) = a_{pt} \quad (2.4)$$

$$\forall p \in P, t \in T$$

$$IR_{p0} = 0 \quad \forall p \in P, \quad (2.5)$$

$$\sum_{r \in R_n^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{p'pt}^r + \sum_{r \in R_n^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{p'pt}^r = d_{npt} \quad (2.6)$$

$$\forall p \in P, n \in N, t \in T$$

$$e_{p(t+1)}^s = e_{pt}^s + \sum_{r \in R_s^x} c^{rx} X_{pt}^r - \sum_{r \in R_s^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{pp't}^r \quad (2.7)$$

$$\forall p \in P, s \in S, t \in T$$

$$e_{p0}^s = E_{p0}^s \quad \forall p \in P, s \in S \quad (2.8)$$

$$l_{pt}^s f_{pt}^s - e_{pt}^s \geq 0 \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T \quad (2.9)$$

$$\sum_{p \in P} f_{pt}^s \leq 1 \quad \forall s \in S, t \in T \quad (2.10)$$

$$f_{pt}^s \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T \quad (2.11)$$

$$X_{pt}^r, Y_{p'pt}^r, Z_{pp't}^r, IR_{pt}, e_{pt}^s \leq 0 \quad (2.12)$$

$$\forall r \in R, p \in P, p' \in P, t \in T, s \in S$$

A Função Objetivo (2.1) minimiza o custo total de energia nos vários estágios de movimentação do minério dentro do pátio de estocagem ao longo de um horizonte de planejamento. Os três primeiros termos minimizam o custo de energia do uso de cada rota em um determinado período. O quarto é o custo de energia para manter o minério armazenado no pátio de estocagem. O quinto é o custo da energia desperdiçada para reter o minério de ferro no terminal de descarga. Os dois últimos são o custo de energia para alterar um produto para atender a demandas inesperadas. As variáveis de decisão são as seguintes:

- os tempos de transporte dos produtos pelas diferentes rotas do pátio em cada período, considerando um conjunto de rotas compartilhadas por alguns equipamentos do pátio;
- a quantidade de produto no terminal de descarga não entregue ao final de cada período;
- a quantidade de produtos armazenados nas subáreas do pátio de estocagem; e
- uma indicação do status vazio ou ocupado dessas subáreas.

A Restrição (2.2) garante que as somas dos tempos de transporte do minério de ferro em todas as rotas compartilhadas por cada equipamento do pátio de estocagem sejam menores do que o tempo disponível para atender este conjunto de rotas em um determinado período. Da mesma forma, a Restrição (2.3) garante que o fluxo total do minério de ferro transportado em todas as rotas compartilhadas por cada item do equipamento do pátio de estocagem seja inferior à sua capacidade de fluxo em um determinado período.

As Equações (2.4) e (2.6) garantem o balanço de fluxo entre o fornecedor e a demanda no terminal de descarga e berço em cada período, respectivamente. A quantidade de produto não descarregado no terminal de recepção mede a eficiência do sistema. A Restrição (2.5) indica que o terminal de descarga está vazio no período de planejamento inicial.

A Restrição (2.7) é a equação de balanço de fluxo no pátio de estoque, ou seja, o volume do estoque no próximo período será igual ao volume do estoque atual mais o fluxo de produtos estocados menos o fluxo de produtos recuperados no mesmo estoque durante o período atual. A equação (2.8) garante que o estoque inicial está vazio.

A Equação (2.9) limita a capacidade do estoque pela capacidade da subárea do pátio de cada produto. A Equação (2.10) indica que cada estoque receberá apenas o produto designado em um determinado período. Finalmente, as Restrições (2.11) e (2.12) impõem as restrições binárias e de não-negatividade nas variáveis de decisão correspondentes.

As características do modelo *IOSEP* estão resumidos na Tabela 2. Neste modelo a característica mais importante é a presença do custo da energia como principal estratégia para atingir a eficiência deste sistema.

Tabela 2 – Características do modelo *IOSEP* multiproduto.

Artigo	Definição do Problema	Tipo de Pátio	Modelagem	Objetivos	Técnicas
(SERVARE JUNIOR et al., 2020)	MPr, MP, D, CF, Ca, Ses, NBa	Minério de Ferro	MILP	Energy	Exato e LBRH

2.3 Formulação do problema *IOSEP* com múltiplos fornecedores de energia (*IOSEPmes*)

O modelo matemático do problema *IOSEPmes* utiliza as Equações (2.14) a (2.25) do problema *IOSEP*. As demais equações serão apresentadas a seguir. Estas equações são necessárias para incluir os diferentes fornecedores de energia que devem alimentar os equipamentos do pátio-porto. Além disso, considera-se neste modelo matemático a possibilidade de alteração no fornecedor de energia para o pátio a cada hora, conforme a melhor combinação entre preço de energia, disponibilidade de oferta e a demanda, e que somente um fornecedor de energia deve abastecer as cargas elétricas.

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} C_t^f U_t W_t^f \quad (2.13)$$

sujeito a:

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{r \in R^x} X_{pt}^r + \sum_{r \in R^y} \sum_{p' \in P} Y_{pp't}^r + \sum_{r \in R^z} \sum_{p' \in P} Z_{pp't}^r \right) \leq j_t^m \quad (2.14)$$

$$\forall m \in M, t \in T$$

$$\sum_{p \in P} \left(\sum_{r \in R_m^x} c^{rx} X_{pt}^r + \sum_{r \in R_m^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{pp't}^r + \sum_{r \in R_m^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{pp't}^r \right) \leq b^m j_t^m \quad (2.15)$$

$$\forall m \in M, t \in T, f \in F$$

$$\sum_{r \in R^x} c^{rx} X_{pt}^r + \sum_{r \in R^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{pp't}^r + (IR_{pt} - IR_{p(t-1)}) = a_{pt} \quad (2.16)$$

$$\forall p \in P, t \in T, f \in F$$

$$X_{pt}^r \leq 1 \quad \forall p \in P, t \in T, r \in R^x \quad (2.17)$$

$$Y_{pp't}^r \leq 1 \quad \forall p \in P, p' \in P, t \in T, r \in R^y \quad (2.18)$$

$$Z_{pp't}^r \leq 1 \quad \forall p \in P, p' \in P, t \in T, r \in R^z \quad (2.19)$$

$$IR_{p0} = R_{p0} \quad \forall p \in P, f \in F \quad (2.20)$$

$$\begin{aligned} \sum_{r \in R_n^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{pp't}^r + \sum_{r \in R_n^y} \sum_{p' \in P} c^{ry} Y_{pp't}^r &= d_{npt} \\ \forall p \in P, n \in N, t \in T, f \in F \end{aligned} \quad (2.21)$$

$$e_{p(t+1)}^s = e_{pt}^s + \sum_{r \in R_s^x} c^{rx} X_{pt}^r - \sum_{r \in R_s^z} \sum_{p' \in P} c^{rz} Z_{pp't}^r \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T \quad (2.22)$$

$$e_{p0}^s = E_{p0}^s \quad \forall p \in P, s \in S \quad (2.23)$$

$$l_{pt}^s f_{pt}^s - e_{pt}^s \geq 0 \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T \quad (2.24)$$

$$\sum_{p \in P} f_{pt}^s \leq 1 \quad \forall s \in S, t \in T \quad (2.25)$$

$$\begin{aligned} \sum_{p \in P} \sum_{r \in R^x} Er^{rx} X_{pt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^y} Er^{ry} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^z} Er^{ry} Z_{pp't}^r \\ + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^y} Ec_{pp'} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^z} Ec_{pp'} Z_{pp't}^r \\ + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} Es^s e_{pt}^s + \sum_{p \in P} Eir IR_{pt} = U_t \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.26)$$

$$U_t \leq \sum_{f \in F} D_t^f W_t^f \quad \forall t \in T \quad (2.27)$$

$$\sum_{f \in F} W_t^f = 1 \quad \forall t \in T \quad (2.28)$$

$$W_t^f, f_{pt}^s \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T, f \in F \quad (2.29)$$

$$\begin{aligned}
& X_{pt}^r, Y_{p't}^r, Z_{pp't}^r, IR_{pt}, e_{pt}^s, U_t \leq 0 \\
& \forall r \in R, p \in P, p' \in P, t \in T, s \in S, f \in F
\end{aligned} \tag{2.30}$$

A Função Objetivo (2.13) mensura o custo energético do pátio no horizonte de tempo proposto. O conjunto de Equações (2.14) limita a disponibilidade de tempo para os equipamentos compartilhados, por sua vez, o conjunto de Equações (2.15) limita a capacidade destes mesmos equipamentos.

As Restrições (2.16) apontam que toda a capacidade produtiva das minas é absorvida pelo sistema ou armazenada na recepção do sistema. As Equações (2.17), (2.18) e (2.19) indicam que o tempo de funcionamento das rotas em cada período não excederá uma hora.

A Equação (2.20) indica a quantidade de cada produto na recepção no início do horizonte de planejamento. As restrições (2.21) garantem que a demanda dos berços será atendida pelos fluxos de minério originados da recepção do sistema ou dos pátios.

A Restrição (2.22) garante o fluxo de estoque de produtos nos pátios ao longo do Horizonte de Planejamento e a Restrição (2.23) indica a quantidade de cada produto no pátio início do período de planejamento. A Restrição (2.24) limita a capacidade do pátio, caso ele seja utilizado. A Restrição (2.25) assegura que não haverá dois produtos diferentes estocados em um mesmo pátio no mesmo período.

A Restrição (2.26) indica a quantidade de energia consumida durante o horizonte de planejamento a partir da utilização dos equipamentos. A Equação (2.27) indica que a quantidade de energia consumida não vai superar a quantidade de energia disponibilizada pelas fontes, e a Restrição (2.28) indica que apenas uma fonte de energia vai ser utilizada em cada período de planejamento. As Restrições (2.29) e (2.30) são referentes à natureza das variáveis, como binárias e não negativas, respectivamente.

Usando a nomenclatura proposta nessa Tese, resume-se as características do problema *IOSEP* na Tabela 3. A mais importante é a presença de múltiplos fornecedores de energia.

Tabela 3 – Características principais do modelo *IOSEPmes*.

Definição do Problema	Tipo de Pátio	Modelagem	Objetivos	Técnicas
MPr, MP, D, CF, Ca, Mes, NBa	Minério de Ferro	MILP	Energy	Exato e HR

2.4 Formulação do problema *IOSEP* com múltiplos fornecedores de energia e bateria (*IOSEPmesb*)

O modelo matemático *IOSEPmes* apresentado na Seção 2.3 pode ser incrementado com a utilização de baterias para armazenamento da energia ao longo do tempo para posterior utilização em momentos que o valor da energia seja superior. Para realizar esta modelagem utiliza-se as Equações (2.13)-(2.25) apresentadas na Seção 2.3 e adiciona-se as seguintes restrições:

$$\begin{aligned}
& \sum_{p \in P} \sum_{r \in R^x} Er^{rx} X_{pt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^y} Er^{ry} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^z} Er^{ry} Z_{pp't}^r \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^y}^{p' \neq p} Ec_{pp'} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^z}^{p' \neq p} Ec_{pp'} Z_{pp't}^r \\
& + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} Es^s e_{pt}^s + \sum_{p \in P} Eir IR_{pt} + Off_t Q_t = U_t \quad \forall t \in T
\end{aligned} \tag{2.31}$$

$$U_t \leq b_t On_t + \sum_{f \in F} D_t^f W_t^f \quad \forall t \in T \tag{2.32}$$

$$On_t + \sum_{f \in F} W_t^f = 1 \quad \forall t \in T \tag{2.33}$$

$$On_t + Off_t \leq 1 \quad \forall t \in T \tag{2.34}$$

$$b_{t+1} = b_t + Off_t Q_t - On_t U_t \quad \forall t \in T \tag{2.35}$$

$$b_t \leq capb \quad \forall t \in T \tag{2.36}$$

$$b_0 = B_0 \tag{2.37}$$

$$W_t^f, f_{pt}^s, Off_t, On_t \in \{0, 1\} \quad \forall p \in P, s \in S, t \in T, f \in F \tag{2.38}$$

$$\begin{aligned}
& X_{pt}^r, Y_{p'pt}^r, Z_{pp't}^r, IR_{pt}, e_{pt}, U_t, b_t \leq 0 \\
& \forall r \in R, p \in P, p' \in P, t \in T, s \in S, f \in F
\end{aligned} \tag{2.39}$$

A Restrição (2.31) indica a quantidade de energia consumida durante o horizonte de planejamento a partir da utilização dos equipamentos, incluindo a alimentação da

bateria, caso ela ocorra. A Equação (2.32) garante que a quantidade de energia consumida não vai superar a quantidade de energia disponibilizada pelas fontes. E caso a bateria esteja alimentando o sistema, a quantidade de energia armazenada deverá ser suficiente. Por sua vez, a Equação (2.33) indica que apenas a bateria vai alimentar o sistema ou apenas uma fonte de energia vai ser utilizada em cada período de planejamento.

A Restrição (2.34) indica que a bateria vai receber ou fornecer carga em um período, não trabalhando nos dois sentidos de maneira simultânea. A Restrição (2.35) trata de uma restrição de fluxo de carga na bateria e a Restrição (2.36) garante que a carga recebida da bateria não vai ultrapassar a capacidade da bateria. A Restrição (2.37) assegura que uma bateria inicia o período de planejamento com uma determinada quantidade inicial de energia. Por fim, as Restrições (2.38) e (2.39) são referentes a natureza das variáveis, como binárias e não negativas, respectivamente.

A Tabela 4 mostra as características do problema *IOSEPmesb*, usando a mesma nomenclatura. A mais importante é a possibilidade do gestor escolher entre a utilização dos diferentes fornecedores de energia elétrica e o uso de baterias para atingir a eficiência energética do pátio-porto.

Tabela 4 – Características principais do modelo *IOSEPmesb*.

Definição do Problema	Tipo de Pátio	Modelagem	Objetivos	Técnicas
MPr, MP, D, CF, Ca, Mes, Ba	Minério de Ferro	MILP	Energy	Exato e HR

2.5 Linearização dos modelos MINLP

Os modelos matemáticos apresentados nas Equações (2.3) e (2.4) possuem termos com produto entre variáveis, tornando o modelo não linear. Em 2.3, o termo $U_t W_t^f$ na FO (2.13) é não-linear devido à multiplicação entre duas variáveis, são elas: U_t é uma variável contínua e W_t^f é uma variáveis binária. Para evitar a complexidade de um MINLP, os modelos apresentados podem ser linearizados conforme a proposta de (BEMPORAD; MORARI, 1999) a partir da definição de novas variáveis:

$$G_t^f = U_t W_t^f \quad \forall t \in T, f \in F \quad (2.40)$$

E, então, a reformulação da FO (2.13) da seguinte forma:

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{f \in F} C_t^f G_t^f \quad (2.41)$$

Dessa forma, o modelo *IOSEPmes* terá uma nova função objetivo definida pela Equação (2.41). Entretanto, (BEMPORAD; MORARI, 1999) aponta a necessidade de incluir as seguintes restrições para linearização do modelo matemático:

$$G_t^f - M_1 W_t^f \leq 0 \quad (2.42)$$

$$-G_t^f + n_1 W_t^f \leq 0 \quad (2.43)$$

$$G_t^f - U_t + n_1(1 - W_t^f) \leq 0 \quad (2.44)$$

$$-G_t^f + U_t - M_1(1 - W_t^f) \leq 0 \quad (2.45)$$

$$G_t \leq 0 \quad \forall t \in T, f \in F \quad (2.46)$$

Conforme proposta de (BEMPORAD; MORARI, 1999), os valores M_1 e n_1 são representados por valores definidos pelas seguintes cotas:

$$M_1 = \max_{t \in T} U_t \quad (2.47)$$

$$n_1 = \min_{t \in T} U_t \quad (2.48)$$

Sendo assim, os valores M_1 e n_1 foram estimados com base nas projeções máximas de mínimas de consumo dos equipamentos. Essa equiparação ocorre para ter maior convergência entre os valores utilizados. A partir destas alterações, obtidas através das Equações (2.40) a (2.46), o modelo matemático *IOSEPmes* é definido como:

- Função Objetivo: (2.41)
- Sujeito a: (2.14) - (2.28); (2.42) - (2.45); (2.29); (2.30); (2.46)

Em relação ao *IOSEPmesb* apresentado na Equação (2.4), além da FO (2.13), as Restrições (2.32), (2.33) e (2.35) apresentam termos com a multiplicação entre variáveis. Seguindo o mesmo procedimento proposto por (BEMPORAD; MORARI, 1999) realizado para o modelo proposto em 2.3 e a lógica proposta pelas equações (2.47) e (2.48) têm-se as seguintes variáveis:

$$H_t = Q_t \text{ Off}_t \quad \forall t \in T \quad (2.49)$$

$$K_t = b_t \text{ On}_t \quad \forall t \in T \quad (2.50)$$

$$I_t = U_t On_t \quad \forall t \in T \quad (2.51)$$

Assim, substituindo (2.49) em (2.31), (2.50) em (2.32) e (2.51) em (2.35) as restrições ficam atualizadas da seguinte maneira:

$$\begin{aligned} & \sum_{p \in P} \sum_{r \in R^x} Er^{rx} X_{pt}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^y} Er^{ry} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \in P} \sum_{r \in R^z} Er^{ry} Z_{pp't}^r \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{p' \neq p} \sum_{r \in R^y} \beta_{pp'} Y_{pp't}^r + \sum_{p \in P} \sum_{p' \neq p} \sum_{r \in R^z} \beta_{pp'} Z_{pp't}^r \\ & + \sum_{p \in P} \sum_{s \in S} Es^s e_{pt}^s + \sum_{p \in P} EirIR_{pt} + H_t = U_t \quad \forall t \in T \end{aligned} \quad (2.52)$$

$$U_t \leq K_t + \sum_{f \in F} D_t^f W_t^f \quad \forall t \in T \quad (2.53)$$

$$b_{t+1} = b_t + H_t - I_t \quad \forall t \in T \quad (2.54)$$

Consequentemente, são adicionadas as seguintes restrições:

$$H_t - M_2 Off_t \leq 0 \quad (2.55)$$

$$-H_t + n_2 Off_t \leq 0 \quad (2.56)$$

$$H_t - Q_t + n_2(1 - Off_t) \leq 0 \quad (2.57)$$

$$-H_t + Q_t - M_2(1 - Off_t) \leq 0 \quad (2.58)$$

$$K_t - M_3 On_t \leq 0 \quad (2.59)$$

$$-K_t + n_3 On_t \leq 0 \quad (2.60)$$

$$K_t - b_t + n_3(1 - On_t) \leq 0 \quad (2.61)$$

$$-K_t + b_t - M_3(1 - On_t) \leq 0 \quad (2.62)$$

$$I_t - M_4 On_t \leq 0 \quad (2.63)$$

$$-I_t + n_4 On_t \leq 0 \quad (2.64)$$

$$I_t - U_t + n_4(1 - On_t) \leq 0 \quad (2.65)$$

$$-I_t + U_t - M_4(1 - On_t) \leq 0 \quad (2.66)$$

$$H_t, K_t, I_t \leq 0 \quad \forall t \in T \quad (2.67)$$

onde:

$$M_2 = \max_{t \in T} Q_t \quad (2.68)$$

$$n_2 = \min_{t \in T} Q_t \quad (2.69)$$

$$M_3 = \max_{t \in T} b_t \quad (2.70)$$

$$n_3 = \min_{t \in T} b_t \quad (2.71)$$

$$M_4 = \max_{t \in T} U_t \quad (2.72)$$

$$n_4 = \min_{t \in T} U_t \quad (2.73)$$

As soluções dos problemas definidos pelas Equações (2.68)-(2.73) foram estimados, conforme explicado anteriormente. A partir destas formulações, o modelo *IOSEPmesb* é definido como:

- Função Objetivo: (2.41)
- Sujeito a: (2.14) - (2.28); (2.52); (2.53); (2.33); (2.34); (2.54); (2.36) - (2.38); (2.55) - (2.66); (2.38); (2.39); (2.67).

3 Heurísticas propostas

3.1 Heurística baseada em relaxação linear

Um problema de otimização pode muitas vezes se tornar difícil de resolver de maneira ótima. Por exemplo, quando o horizonte de planejamento é muito grande, o número de variáveis do modelo MILP aumenta consideravelmente, impossibilitando de resolvê-lo de forma exata (UMETANI; FUKUSHIMA; MORITA, 2017). Algumas vezes a busca da solução ótima para o problema pode ser interrompida com a dificuldade de processamento das máquinas devido a complexidade de modelos matemáticos. Dessa forma, técnicas que utilizem modelos de Programação Linear (LP, do inglês, *Linear Programming*) podem permitir a redução da complexidade do problema.

Essa abordagem permite que problemas mais complexos que envolvam modelos MILPs ou IPs (Programação Inteira, do inglês *Integer Programming*) sejam resolvidos a partir da LP. Alguns trabalhos já foram publicados nesse contexto, desde problemas teóricos como a soma de razões lineares (CARLSSON; SHI, 2013) a aplicações de maneira prática, tais como na gestão de produção e recursos como o *Pooling* (GOUNARIS; MISENER; FLOUDAS, 2009), de projeto de rede logísticas (THANH; PÉTON; BOSTEL, 2010; FATTAHI et al., 2015), projeto da estrutura do motor de aeronaves (ZHANG; NIU, 2018) e planejamento de refinaria (RANA; KHOR; ZABIRI, 2021). Em gestão de recursos energéticos foi aplicado para o planejamento de sistemas de transmissão (TAYLOR; HOVER, 2011), fluxo de energia (DING et al., 2014; DING et al., 2017; ERGUN et al., 2019), carga e descarga de veículos elétricos (UMETANI; FUKUSHIMA; MORITA, 2017) e perda de transmissão (SHAHZAD et al., 2021).

O algoritmo da heurística baseada em relaxação linear (LRBH, do inglês *Linear Relaxation Based Heuristic*) é baseado na proposta em Thanh, Péton e Bostel (2010) e envolve relaxamentos sucessivos para determinar uma possível solução para o modelo. A relaxação linear consiste em substituir as restrições de integralidade das variáveis inteiras por sua contraparte contínua. Essa técnica encontra uma solução refinada após algumas iterações de solução. É possível chegar a uma solução fracionária após cada rodada e a técnica não parará sem encontrar uma solução inteira. Entre as iterações, as restrições com novos limites para as variáveis alteradas serão adicionadas ao modelo.

Neste trabalho, o LRBH funciona em duas fases (veja a Figura 6). Na Fase 1, o algoritmo reescreve o modelo matemático relaxado, ou seja, como um modelo LP por excluir as restrições binárias (2.11). Além disso, inclui a Equação (3.1) como um limite para as variáveis de decisão que antes eram binárias.

$$0 \leq f_{pt}^s \leq 1 \quad \forall \quad p \in P, \quad s \in S, \quad t \in T \quad (3.1)$$

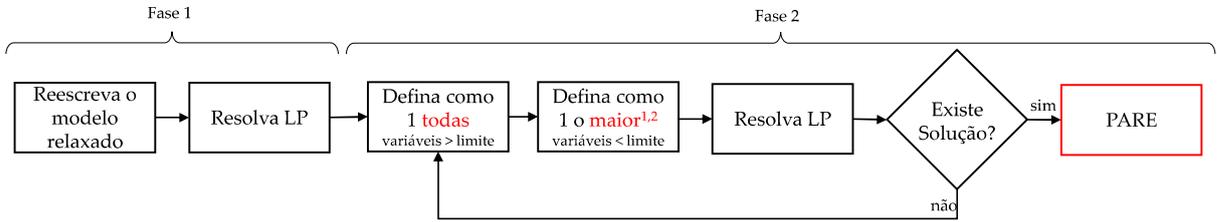


Figura 6 – Fluxograma que representa a estrutura da Heurística baseada em relaxação linear (¹a maior variável sem um produto designado para pátio, e; ²a variável deve ser maior que 0).

Na Fase 2, o código corrige o modelo para indicar após as iterações um número inteiro e uma possível solução para o problema. Ainda durante a fase 2, um conjunto de variáveis inadequadas pode resultar em soluções inviáveis (THANH; PÉTON; BOSTEL, 2010). Após o relaxamento, o modelo é resolvido como um LP; então, a solução encontrada é analisada para determinar os valores alcançados para f_{pt}^s . Esta análise consiste em verificar quantos f_{pt}^s receberam valores maiores que o limite. Por sua vez, esse limite indicará a velocidade com que essa técnica será executada.

Na proposta de Thanh, Péton e Bostel (2010) o limite é indefinido e a transformação ocorre apenas com o maior valor entre todos os valores de f_{pt}^s . Nesse caso, a técnica definirá a utilização de apenas uma variável (uma variável binária assume o valor 1) por iteração.

Na segunda fase, se as variáveis f_{pt}^s são maiores ou iguais ao limite, será definido como pátio a ser utilizado, ou seja, na próxima iteração, eles serão adicionados ao modelo como restrições, conforme mostrado na Equação (3.2):

$$f_{pt}^s = 1 \quad \forall \quad f_{pt}^s \geq \text{limite} \quad (3.2)$$

Em seguida, um processo iterativo é executado até que todos os pátios necessários tenham produtos alocados. Nesta fase, verifica-se a solução do LP e define-se como usado (a variável assume 1) a maior variável inferior ao limite usado. Nesta etapa, é necessário verificar simultaneamente se algum produto está designado no estoque.

O motivo pelo qual o maior valor assumido por uma resposta encontrada na relação que esteja abaixo do limite inferior também é definido como utilizado é que o modelo determina que sua ocupação será com um valor residual, mesmo que possa ser muito pequeno, para atender a demanda. É importante que todas as demandas sejam atendidas,

então este estoque deve ser formado de qualquer maneira. Em seguida, a técnica realizará o mesmo procedimento para o maior valor das variáveis abaixo do limite (Figura 7).

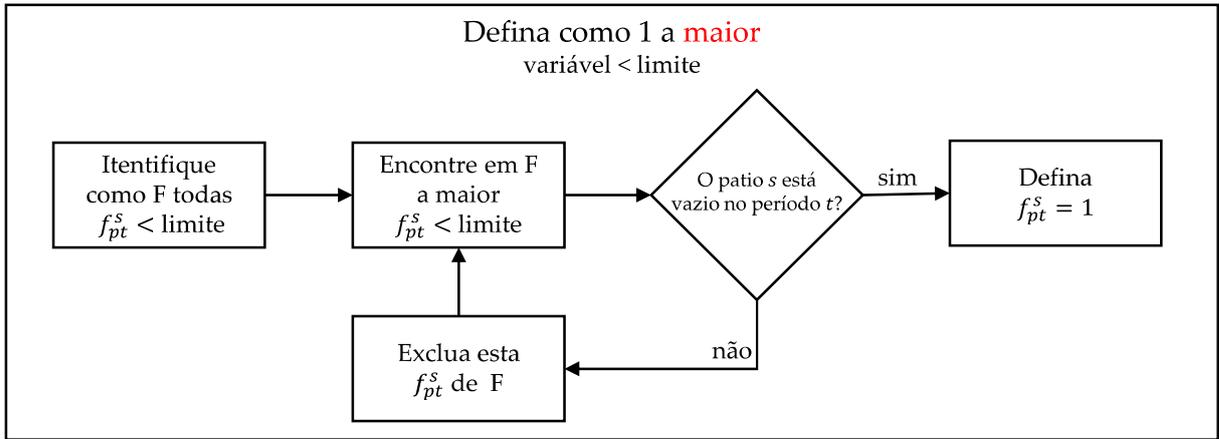


Figura 7 – Como funciona o processo de definição da maior variável menor que o limite.

Se após o modelo ser resolvido, e no final da iteração, todas as variáveis f_{pt}^s forem 0 ou 1 (ou seja, ocorre uma solução existente ou solução viável), então a heurística para e apresenta essa solução. Se houver algumas variáveis fracionárias, o processo retorna ao início da Fase 2. O Algoritmo 1 apresenta a estrutura básica do LRBH para este problema IOSEP.

Algorithm 1 Pseudo-código da Heurística Baseada em Relaxação Linear

Require: MILP (Mixed Integer Linear Programming model)

```

1: LP ← Relaxar(MILP);
2: Solution ← SolveLP(LP);
3: while  $f_{pt}^s > 0 \parallel f_{pt}^s < 1$  do
4:   if  $f_{pt}^s \geq limite$  then
5:      $f_{pt}^s \leftarrow 1$ ;
6:   end if
7:   for maior  $f_{pt}^s < limit$  do
8:      $f_{pt}^s \leftarrow 1$ ;
9:   end for
10:  LP ← Update_model( $f_{pt}^s$ , LP);
11:  Solution ← SolveLP(LP);
12: end while
13: return Solution;
  
```

O Algoritmo 1 recebe como entrada o Modelo de Programação Linear Inteira Mista. Na Linha 1 o modelo apresentado como entrada é relaxado, ou seja, são retiradas as restrições de natureza de variáveis binárias e incluídas restrições lineares conforme Equação (3.1). Na Linha 2, o modelo relaxado é resolvido e armazenada sua solução.

No laço da Linha 3 à Linha 12 são verificadas todas as soluções que são maiores que o limite definido e a maior solução menor que o limite e adicionadas no modelo uma restrição que as defina como o valor 1. Realizado este procedimento o modelo é atualizado (Linha 10) e resolvido novamente (Linha 11). Após a quantidade de iterações suficientes para não restar mais f_{pt}^s fracionários o processo retorna uma solução possível na Linha 13.

3.2 Heurística baseada em Horizonte de Rolagem

As comunidades científicas voltadas para desenvolvimento de pesquisas nas áreas de inteligência artificial (IA) e pesquisa operacional (PO) têm buscado técnicas mais sofisticadas para abordar problemas de alocação de recursos dinâmicos e outros problemas de otimização estocástica dinâmica (BERTSIMAS et al., 2017). Com o objetivo de replanejar, As'ad e Demirli (2010) utilizam o modelo matemático proposto inicialmente no início de cada período de uma maneira iterativa visando o replanejamento e as decisões de produção são atualizadas em conformidade com os resultados obtidos. Esta técnica, conhecida como Horizonte de Rolagem foi apresentada em Rodrigues et al. (1996) como uma técnica para replanejamento de lotes em plantas químicas.

O Horizonte de Rolagem é um algoritmo utilizado para resolver problemas de otimização de grande porte, tais como o planejamento de uma planta hidrotermal (GUIGUES; SAGASTIZÁBAL, 2012), gerenciamento da interrupção de frotas de trens (NIELSEN; KROON; MARÓTI, 2012), dimensionamento e produção de lotes em uma empresa no setor de pisos de madeira (TIACCI; SAETTA, 2012), o problema integrado no planejamento de produção, transporte e inventário de biocombustíveis (BREDSTRÖM; FLISBERG; RÖNNQVIST, 2013), planejamento da combinação das redes de unidades de calor e energia (KOPANOS; PISTIKOPOULOS, 2014), coordenação de produção-distribuição das cadeias de suprimentos de gases industriais (ZAMARRIPA et al., 2016), problema de taxa fixa de transporte (BERTAZZI; MAGGIONI, 2018), o problema de complementaridade mista estocástica no setor de suprimento energético (DEVINE; BERTSCH, 2018) e a programação de um sistema de fornecimento de gás subproduto no processo de fabricação de ferro e aço (PENA; OLIVEIRA JUNIOR; SALLES, 2019).

Embora uma proposta apresentada por Li e Ierapetritou (2010) seja para realizar o replanejamento periódico a fim de reduzir a dimensão do problema, nos casos reais as incertezas relativas ao processo podem ser fatores relevantes para utilização da técnica, uma vez que o sistema está sujeito a mudanças nos parâmetros do modelos definidos no período inicial. O algoritmo de horizonte de rolagem desenvolvido nesta Tese é baseado na estrutura proposta por (KOPANOS; PISTIKOPOULOS, 2014) e (SILVENTE et al., 2015) a qual está representada na Figura 8.

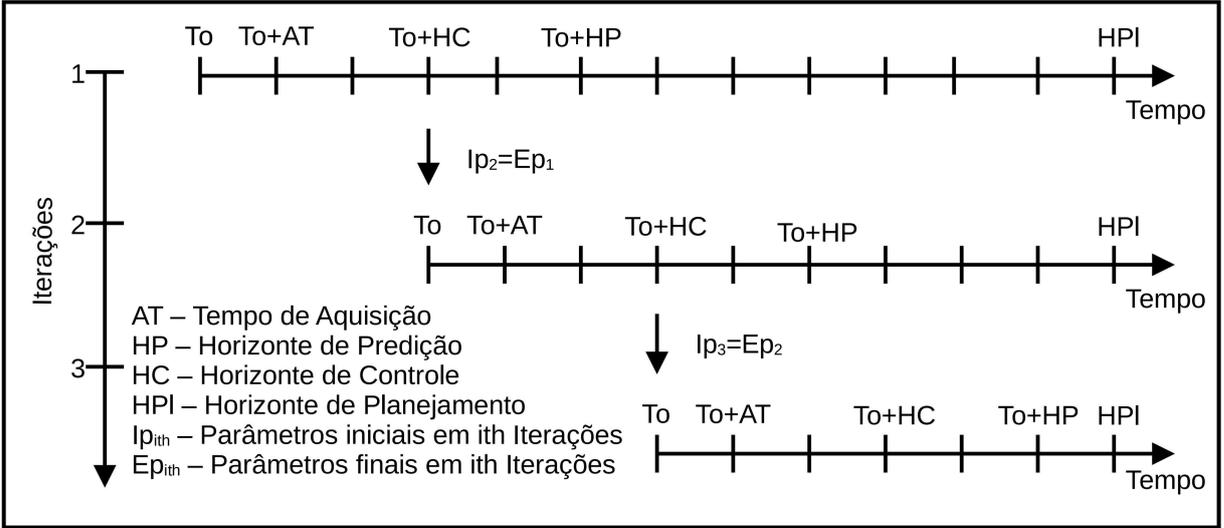


Figura 8 – Estrutura do algoritmo de horizonte de rolagem.

Outra importante observação é acerca da redução da dimensão dos problemas de otimização, pois o problema original, com um longo horizonte de planejamento, pode ser resolvido de forma iterativa por meio de múltiplos problemas de otimização com horizontes de planejamento menores e, conseqüentemente com menores quantidades de variáveis de decisão. Dessa forma o cenário proposto para o problema de planejamento do pátio-porto poderá ser ainda maior e mais diversificado, como por exemplo uma quantidade de produtos armazenados maior em relação ao problema original.

Considerando a estrutura do algoritmo de Horizonte de Rolagem (HR) apresentado na Figura 8, descreve-se a seguir os passos do algoritmo de HR proposto:

Passo 0) Dados os Conjuntos (*conjuntos*) e Parâmetros (*parâmetros*) definidos na Seção 2.2, escolha adequadamente o Horizonte de Planejamento (HPI), Horizonte de Predição (HP), Horizonte de Controle (HC). Faça $iter = 0$.

Passo 1) Seja o subconjunto de tempos

$$T_{t_0} = \{t_0, t_0 + A_T, t_0 + 2A_T, \dots, t_0 + HP\}, \text{ tal que } T_{t_0} \in T = \{0, HPI\}$$

onde $t_0 = iter \times HC$ e A_T é o período de aquisição dos dados necessários para o planejamento do pátio-porto.

Considerando o subconjunto T_{t_0} , faça as previsões de todos os parâmetros operacionais do sistema pátio-porto, sujeitos a incertezas, no horizonte de predição $PredHoriz$, como por exemplo: falhas de equipamentos usados no transporte, empilhamento e recuperação do minério de ferro (j_t^m), disponibilidade de energia (D_t^f) e custo de energia dos fornecedores ao longo do tempo (C_t^f), atraso na chegada de minério das minas (a_{pt}) ou atraso na atracação de navios nos berços (d_{npt}).

Passo 2) Resolva o modelo MILP para cada instante de amostragem $t \in T_{t_0}$, considerando:

- Função Objetivo: (2.41)
- Sujeito a: (2.14) - (2.28); (2.52); (2.53); (2.33); (2.34); (2.54); (2.36) - (2.38); (2.55) - (2.66); (2.38); (2.39); (2.67).

A FO (2.41) quantifica o total do custo relacionado com o consumo de energia necessário para abastecer o pátio-porto a partir da utilização das fontes de energia disponíveis, considerando suas disponibilidades, e as características dos equipamentos usados no transporte do minério desde a chegada dos trens até o carregamento dos navios, dados os diferentes tipos de produtos, ou minério de ferro com características distintas.

Passo 3) Envie as variáveis de decisão calculadas no intervalo correspondente aos instantes t_0 até $t_f = t_0 + HC-A_T$ para o centro de controle das operações do pátio-porto, para que os operadores definam: as rotas de transporte de minério, a quantidade do minério de ferro que deve ser alocada em cada pilha do pátio, a quantidade de energia a ser comprada de cada fornecedor, e a quantidade energia a ser armazenada na bateria. As variáveis de decisão calculadas nos instantes compreendidos entre $t_f + A_T$ até $t_f + PH$ são descartadas.

Passo 4) Faça $iter = iter + 1$, e retorne ao **Passo 1** se $iter \leq \frac{HPI}{A_T}$. Caso contrário, pare.

A implementação do algoritmo para *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* necessita de uma integração vertical das tarefas pátio-porto, de acordo com a arquitetura hierárquica do ISA-95 para que os níveis de instrumentação e controle (execução da produção) possam se comunicar com os níveis de planejamento de negócios e logísticos (gestão de energia e programação de produção), convertendo dados, eventos e informações do mundo real para o mundo digital e vice-versa (CSALÓDI et al., 2021). Os dados são coletados e analisados em tempo real, para responder instantaneamente a um evento, e as decisões são revisadas visando reagir a mudanças não programadas. Esses requisitos de tomada de decisão em tempo real e flexibilidade podem ser alcançados a partir de tecnologias da indústria 4.0, como *Internet of Things* (IoT), *cyber-physical systems* (CPSs) e *data network*.

Além disso, é necessária uma integração horizontal entre gestão de energia e programação do produção, por meio de uma rede de dados. Essa gestão é feita pelas indústrias instalando micro-redes com geração distribuída composta por energias renováveis, bateria e ponto de conexão com fornecedores de energia formando as *Smart Grids* (HOSSAIN et al., 2019), que utilizam sensores, atuadores, tecnologia da informação e inteligência artificial para obter eficiência, confiabilidade e sustentabilidade energética de acordo com a programação da produção (FAHEEM et al., 2018). Essa integração entre gestão de

energia e programação da produção é feita pelos *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* decidindo a conexão/desconexão de fornecedores de energia e a bateria.

Algumas considerações acerca das características do problema podem direcionar a um problema estocástico devido ao risco quanto ao suprimento de material, ao atraso de navios e às falhas de equipamentos, entre outros, bem como se tornar um problema dinâmico devido ao replanejamento por divergências da proposta inicial planejada.

O fato de o horizonte de rolagem ser uma heurística determinística reativa permitirá reorganizar o sistema pátio-porto de maneira iterativa à medida que surgirem necessidades de replanejamento dentro do horizonte de planejamento. Outra importante observação será acerca da redução do tamanho dos problemas, uma vez que se o problema for resolvido de maneira iterativa e periódica a quantidade de variáveis se tornará menor por se tratar de uma abordagem com período único ou com horizonte de planejamento reduzido sendo subconjunto do horizonte original, dessa forma o cenário proposto poderá ser ainda maior ou diversificar a quantidade de produtos a ser considerado.

Na programação reativa ocorre uma reprogramação de cenários do problema (parâmetros) no final de cada horizonte de controle. Este horizonte de controle é um subconjunto do horizonte de previsão e a reprogramação é feita a partir da coleta de informações do sistema de monitoramento das operações do pátio-porto, e também por meio de previsões de variáveis operacionais que porventura poderão ser modificadas ao longo do horizonte de planejamento.

Após a reprogramação dos cenários, resolve-se o problema de otimização considerando o horizonte de previsão, e aplica-se os resultados obtidos dentro do horizonte de controle. O processo se repete até chegar no horizonte de planejamento desejado.

A programação reativa passa pela reprogramação do cenário a partir do estado no fim de cada horizonte de controle. Esse horizonte de controle é um subconjunto do Horizonte de Previsão e à medida que ocorre a evolução do tempo no cenário a reprogramação ocorre avançando com o horizonte de previsão.

O Algoritmo 2 apresenta a estrutura básica do algoritmo do Horizonte de Rolagem para este *IOSEP* considerando uma revisão periódica nos parâmetros em instantes múltiplos do horizonte de controle. Como entrada, o algoritmo requer o Horizonte de Controle, o Horizonte de Previsão e Horizonte de Planejamento, bem como o Modelo de Programação Linear Inteira Mista.

O algoritmo se inicia na Linha 1 com a inicialização em 0 de um contador de iterações. O instante inicial é calculado na Linha 2 e os parâmetros do modelo estimados com base no instante inicial na Linha 3. Com base nas informações de Horizonte de Previsão, Horizonte de Controle, instante inicial e parâmetros a Linha 4 atualiza o modelo matemático para ser resolvido somente dentro do Horizonte de Previsão.

Algorithm 2 Pseudo-código do Horizonte de Rolagem

Require: HC (Horizonte de Controle), HP (Horizonte de Predição), HPl (Horizonte de Planejamento), $MILP$ (Mixed Integer Linear Programming model)

```

1:  $iter \leftarrow 0$ ;
2:  $instantinicial \leftarrow iter \times HC$ ;
3:  $parameter \leftarrow estimateparameter(instantinicial)$ ;
4:  $MILP \leftarrow model(HP, HC, instantinicial, parameter)$ ;
5:  $s \leftarrow SolveMILP(MILP)$ ;
6:  $solution \leftarrow s(iter)$ ;
7: while  $iter \leq HPl$  do
8:    $iter \leftarrow iter + 1$ ;
9:    $instantinicial \leftarrow iter \times HC$ ;
10:   $parameter \leftarrow estimateparameter(instantinicial)$ ;
11:   $MILP \leftarrow Update\_model(s, instantinicial, parameter)$ ;
12:   $s \leftarrow SolveMILP(MILP)$ ;
13:   $solution \leftarrow s(iter)$ ;
14: end while
15: return  $solution$ ;

```

Na Linha 5 o modelo matemático é resolvido para o Horizonte de Predição e na Linha 6 a solução é armazenada para o Horizonte de Controle, isto é, o primeiro período de planejamento. O laço apresentado entre as Linhas 7 e 14 realiza os mesmos procedimentos apresentados nas linhas anteriores ao longo do Horizonte de Planejamento. Essa evolução indica a execução do planejamento a partir do apresentado como programação para o Horizonte de Controle. Até que se encerre o Horizonte de Planejamento com o retorno da solução encontrada (Linha 15).

4 Resultados computacionais e discussões

Neste capítulo apresentam-se os resultados computacionais obtidos com a solução dos modelos *IOSEP*, *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* utilizando uma máquina com a configuração Intel Core i5 de 3,2 GHz com 8 GB de RAM. As soluções apresentadas serão comparadas com a técnica exata obtida a partir de um *solver* comercial, o CPLEX 12.6 (IBM, 2013). Esta comparação é fundamental para avaliar se as soluções subótimas fornecidas pelas heurísticas estão próximas da solução ótima, e ajustar os parâmetros das heurísticas para que isto aconteça da melhor forma possível.

Para tanto, foi escrito um código na linguagem de programação Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2015) para gerar os dados de entrada conforme Tabelas 5, 6, 7, 8, 9 e 10, e modelos matemáticos em formato adequado para o CPLEX realizar a otimização de cada uma das Instâncias propostas, utilizando as configurações padrão deste solucionador. Este código na linguagem Python aplica o pacote de biblioteca CPLEX para executar o LP e MILP e também para facilitar os procedimentos do LRBH e do HR que utilizam o CPLEX e suas funções como parte do código.

A comparação entre as soluções é feita usando o *gap* (conforme definido na Equação (4.1)) para as duas diferentes técnicas de otimização, onde, de forma genérica, uma técnica 1 tem um valor de função objetivo maior do que o da técnica 2 que está sendo comparada.

$$GAP = \frac{OF_{Technique\ 1} - OF_{Technique\ 2}}{OF_{Technique\ 1}} \quad (4.1)$$

4.1 Características físicas do sistema pátio-porto de minério de ferro

Na ausência de dados e parâmetros de um sistema pátio-porto de minério de ferro real para realizar a validação dos modelos propostos, foi necessário gerar parâmetros fictícios para dois sistemas pátio-porto com características diferentes. Valores aleatórios foram usados para definir a demanda de cada navio e criar instâncias simuladas usando parâmetros baseados em (MENEZES; MATEUS; RAVETTI, 2017) e (SERVARE JUNIOR; ROCHA; SALLES, 2020).

De agora em diante o substantivo composto pátio-porto se refere a um sistema pátio-porto descrito no Capítulo 1. O primeiro pátio-porto possui uma quantidade menor de equipamentos, porém permite fazer o planejamento de longo prazo do problema *IOSEP* usando a heurística LBRH. O outro pátio-porto possui um porte maior, ou seja, com uma maior quantidade de equipamentos, o qual será utilizado para resolver os problemas (*IOSEPmes* e *IOSEPmesb*) com diferentes fornecedores de energia e banco de bateria

através do algoritmo de HR.

4.1.1 Características do pátio-porto de pequeno porte

A Tabela 5 apresenta informações referentes ao pátio de pequeno-porte.

Tabela 5 – Características físicas do pátio-porto de pequeno porte.

Característica do Sistema	Quantidade
Pátios	2
Berços	3
Rotas	10
Rotas X	4
Rotas Z	4
Rotas Y	2
Equipamentos no Sistema	20
Equipamentos na Rota X	9
Equipamentos na Rota Z	6
Equipamentos na Rota Y	5

A Tabela 6 apresenta os limites dos parâmetros do modelo *IOSEP*, usados para elaborar diferentes instâncias que serão consideradas nas simulações numéricas do pátio-porto de pequeno porte. Desta forma, é possível avaliar o modelo *IOSEP* para diferentes situações operacionais deste pátio-porto de minério.

Tabela 6 – Parâmetros do modelo *IOSEP* para o pátio-porto de pequeno porte

Parâmetros	Intervalo	Unidade (S.I.)
Demanda Total	Uniforme (3~4)	Tons
Capacidade dos Berços Uniforme	(100~200)	Tons
Capacidade dos Equipamentos	Uniforme (100~200)	Tons
Capacidade das Pilhas	Uniforme (1000~1800)	Tons
Capacidade do Virador de Vagões	Uniforme (40~60)	Tons
Capacidade Produtiva das Minas	Uniforme (500~800)	Tons
Capacidade da Correia Transportadora	Uniforme (80~120)	Tons
Quantidade de Equipamentos por Rota	Uniforme (2~4)	Unidades
Tempo Disponível	Uniforme (2~5)	Horas
Custo de Energia por Período	Uniforme (1~3)	R\$/MWh
Custo de energia em não absorver o minério no sistema	Uniforme (20~30)	R\$/Tons
Custo de energia para o armazenamento no pátio	Uniforme (1~2)	R\$/Tons
Custo de energia ao alterar a qualidade do minério para atender a demanda	Uniforme (10~20)	R\$/Tons

Cada parâmetro das instâncias encontra-se em um intervalo cujos valores máximo e mínimo são determinados a partir de uma escolha aleatória uniforme. Por sua vez, as instâncias são definidas com base no tamanho do problema. Ao aumentar o horizonte de planejamento e os diferentes tipos de minério de ferro ou produtos armazenados no pátio de estocagem, espera-se que a complexidade aumente até que a metodologia não seja mais viável. Foram separadas as instâncias de acordo com seus tamanhos. Primeiro, considera-se um horizonte de planejamento de curto prazo (até 24 períodos) e aumenta-se o número de produtos (instâncias 1.1 até 1.5); em seguida, considera-se horizontes de planejamento de médio e longo prazo (instâncias 1.6–1.16) e varia-se a quantidade de produtos (veja Tabela 7).

Tabela 7 – Instâncias do *IOSEP* usadas na simulação do pátio-porto de pequeno porte.

Instância	Horizonte de Planejamento (Períodos)	Tipos de Produto
1.1	3	2
1.2	6	3
1.3	12	4
1.4	18	7
1.5	24	10
1.6	48	10
1.7	72	10
1.8	168	12
1.9	240	12
1.10	336	15
1.11	720	15
1.12	720	20
1.13	1440	25
1.14	1800	30
1.15	2160	30
1.16	2400	30

4.1.2 Características do pátio-porto de grande porte

A Tabela 8 apresenta a configuração do pátio com novas características e um tamanho superior, quando comparado ao pátio-porto anterior, o qual será utilizado para resolver os problemas com múltiplos fornecedores de energia (*IOSEPmes*) e com bateria (*IOSEPmesb*).

Tabela 8 – Características físicas do sistema pátio-porto de grande porte.

Característica do Sistema	Quantidade
Pátios	10
Berços	3
Fornecedores de Energia	3
Rotas	50
Rotas X	20
Rotas Y	10
Rotas Z	20
Equipamentos	45
Equipamentos nas Rotas X	45
Equipamentos nas Rotas Y	25
Equipamentos nas Rotas Z	30

A Tabela 9 apresenta os limites dos parâmetros gerados aleatoriamente para o planejamento energético do pátio-porto de grande porte. Foram utilizados os conjuntos apresentados na Tabela 8 bem como a distribuição uniforme para definir a demanda de cada navio e criar instâncias usadas para resolver os modelos *IOSEPmes* e *IOSEPmesb*.

Tabela 9 – Parâmetros dos modelos *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* para o pátio-porto de grande porte.

Parâmetros	Intervalo	Unidade (S.I.)
Demanda Total	Uniforme (3~4)	Tons
Capacidade do berço	Uniforme (100~200)	Tons
Capacidade do Equipamento	Uniforme (100~200)	Tons
Capacidade do Pátio	Uniforme (1000~1800)	Tons
Capacidade das viradoras de vagão	Uniforme (40~60)	Tons
Capacidade da Mina	Uniforme (500~800)	Tons
Capacidade da Correia Transportadora	Uniforme (80~120)	Tons
Quantidade de equipamentos por rota	Uniforme (2~4)	Unidades
Tempo Disponível	Uniforme (2~5)	Horas
Custo de Energia por período por fonte	Uniforme (300~600)	R\$/MWh
Energia gasta em não transferir o minério de ferro da recepção	Uniforme (20~30)	MWh/Ton
Energia gasta para manter o minério no pátio	Uniforme (1~2)	MWh/Ton
Energia gasta para transformação de produto	Uniforme (10~20)	MWh/Ton

Consideram-se instâncias com um horizonte de planejamento de curto prazo, de até 24 períodos. Porém, à medida que se aumenta os horizontes de planejamento de 2 até 24 períodos, e os diferentes tipos de minério de ferro (produtos armazenados no pátio de estocagem) de 1 até 10, espera-se que a complexidade aumente até não ser possível resolver o modelo MILP. Foram separadas as instâncias de acordo com seus tamanhos. Primeiro, com o aumento do número de produtos e, posteriormente, com o incremento no horizonte de planejamento (veja Tabela 10).

Tabela 10 – Instâncias dos modelos *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* usadas na simulação do pátio-porto de grande porte.

Instância	Horizonte de Planejamento (Períodos)	Tipos de Produto
2.1	2	1
2.2	2	2
2.3	2	4
2.4	2	7
2.5	2	10
2.6	4	1
2.7	4	2
2.8	4	4
2.9	4	7
2.10	4	10
2.11	6	1
2.12	6	2
2.13	6	4
2.14	6	7
2.15	6	10
2.16	12	1
2.17	12	2
2.18	12	4
2.19	12	7
2.20	12	10
2.21	24	1
2.22	24	2
2.23	24	4
2.24	24	7
2.25	24	10

4.2 Simulações do pátio de pequeno porte

4.2.1 Soluções ótimas do *IOSEP*

Considerando o *IOSEP* apresentado pelo modelo matemático representado pelas Equações (2.1) - (2.12), mostra-se a seguir a características das soluções ótimas obtidas a partir das informações contidas nas Tabelas 5, 6 e 7.

A Tabela 11 mostra o esforço computacional medido em segundos (ou fração de segundos) para o *solver* CPLEX indicar a solução ótima. Observe que o problema foi resolvido de forma ótima via CPLEX (IBM, 2013) para as instâncias 1.1 – 1.13. Apesar do MILP ser resolvido de forma exata para as instâncias propostas para o pátio de pequeno porte, o objetivo desta Tese é resolver o problema para um horizonte de planejamento maior e um grande número de produtos solicitados.

Tabela 11 – Função objetivo e tempo de processamento da solução ótima do *IOSEP*

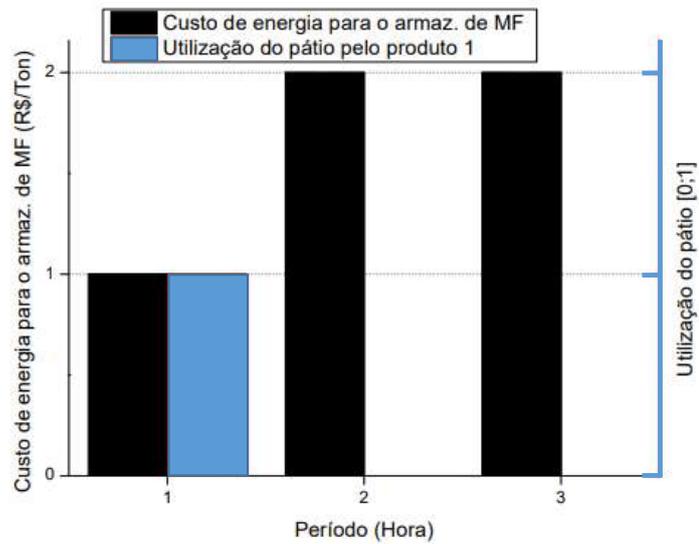
Instância	FO (Custo de Energia em 10^3 R\$)	Tempo (s)
1.1	30,2	0,000
1.2	61,8	0,031
1.3	80,0	0,047
1.4	116,7	0,266
1.5	181,6	1,469
1.6	1.861,2	1,079
1.7	2.048,4	1,172
1.8	2.725,8	6,672
1.9	3.690,4	9,407
1.10	4.504,2	34,021
1.11	6.211,7	145,24
1.12	8.282,4	321,92
1.13	13.796,3	5031,883
1.14	-	*
1.15	-	*
1.16	-	*

*O CPLEX foi interrompido devido à falta de memória computacional.

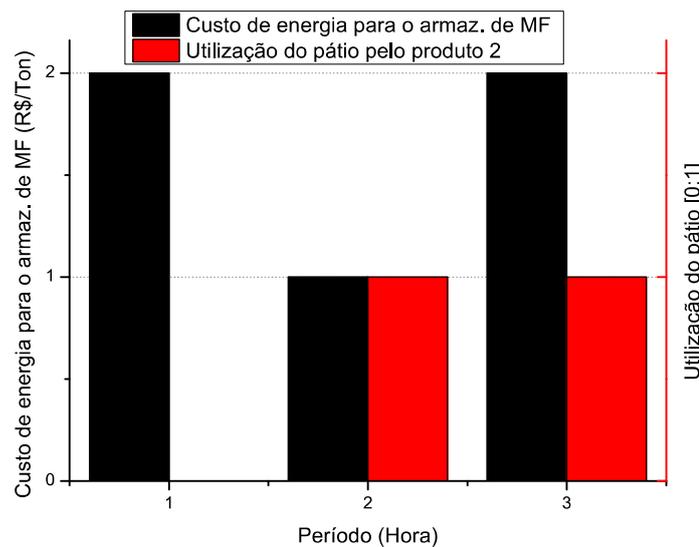
Nas instâncias em que o *IOSEP* foi resolvido de forma exata, as suas restrições foram respeitadas e o tempo de execução aumenta à medida que as instâncias se tornavam mais complexas. Já as instâncias 1.14 e 1.15 não puderam ser resolvidas por falta de memória computacional. Neste caso, recomenda-se utilizar uma máquina mais robusta para obter esta solução ou considerar outras técnicas.

O crescimento do valor da FO dentro de cada grupo de instâncias ocorre devido ao aumento da demanda de clientes, além de um maior fluxo entre as instalações. É importante destacar que instâncias menores, com poucos períodos no horizonte de planejamento, apresentam resultados com tempo computacional menores que 60 s. A menor delas, Instância 1.1, foi escolhida para analisar a sua solução.

Veja na Figura 9 como a solução ótima desta instância decide sobre o armazenamento de dois tipos de minério de ferro (MF) no pátio 1 ao longo do horizonte de planejamento de 2 horas (o primeiro período refere-se ao instante inicial, e o terceiro período ao fim do horizonte de planejamento). Observe que no período 1, o produto 1 deve ser estocado no Pátio 1, pois o gasto energético para realizar o armazenamento deste produto no Pátio 1, mostrado na Figura 9 (a), é menor que o custo de energia para armazenar o produto 2 no Pátio 1, mostrado na Figura 9 (b). No período 2 deve-se estocar neste pátio o produto 2, pelos mesmos motivos. No período 3, o gasto de energia para armazenar ambos produtos no átio 1 é o mesmo, porém o algoritmo decide armazenar o produto 2.



(a)



(b)

Figura 9 – Relação entre custo de energia e utilização do Pátio 1 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b) da solução ótima do *IOSEP* para instância 1.1, onde MF=minério de ferro

A Figura 10 mostra que a utilização do pátio 2 ocorre exclusivamente para o produto 1. Por sua vez, a Figura 11 mostra a designação do produto (1 em azul ou 2 em vermelho) para cada pátio durante os três primeiros períodos da instância 1. Após designar o produto, os fluxos a montante e a jusante serão limitados apenas para este produto ou uma mistura alterada usando este produto.

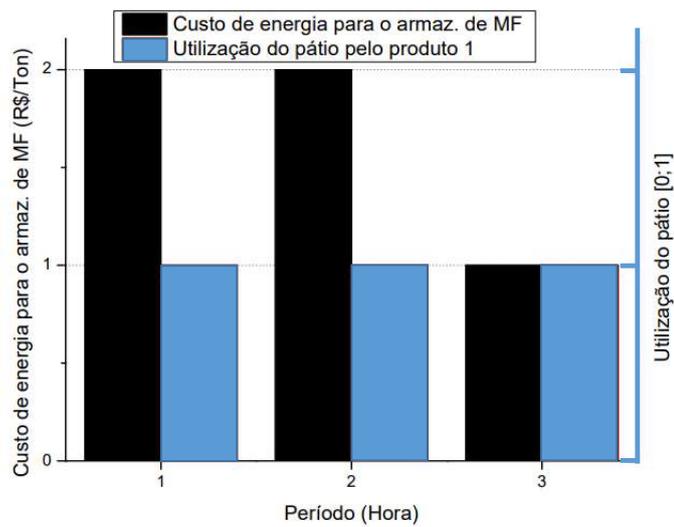


Figura 10 – Custo de energia e utilização do pátio 2 pelo produto 1, fornecidos pela solução ótima do *IOSEP* para instância 1.1, onde MF=minério de ferro

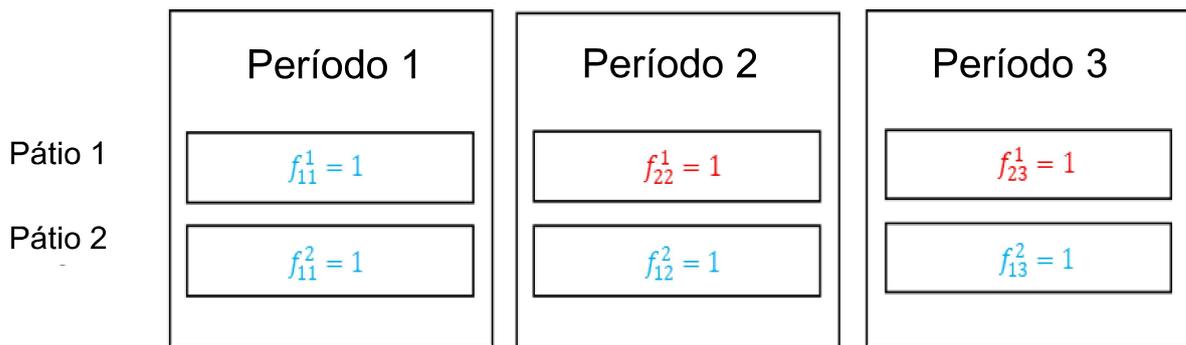


Figura 11 – Valores atribuídos às variáveis binárias da solução ótima do *IOSEP* para a Instância 1.1. Quando o produto 1 é designado para estoque, a variável binária é representada em azul, caso contrário, se o produto 2 é designado para estoque, a variável binária é representado em vermelho.

A Figura 12 mostra a evolução dos custos de energia da solução ótima do modelo *IOSEP* à medida que as instâncias vão aumentando os respectivos horizontes de planejamento e a quantidade de produtos.

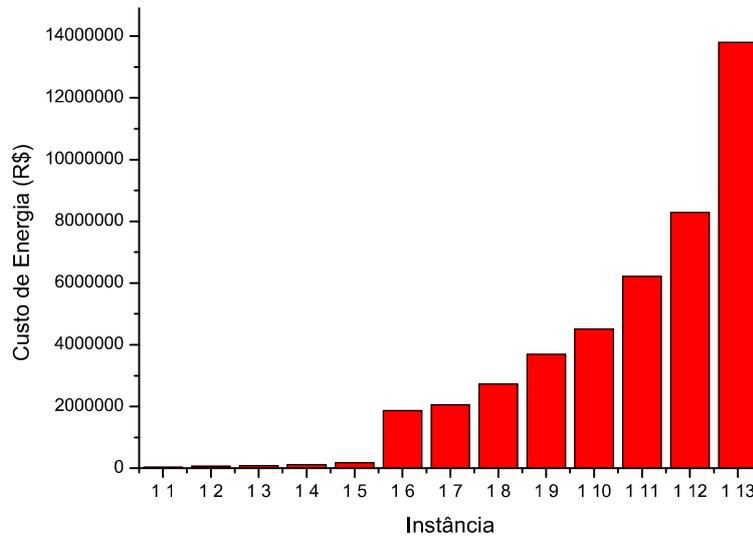


Figura 12 – Custo de energia da solução ótima do problema *IOSEP* para cada instância.

A interpretação das instâncias a partir da verificação da utilização do pátio, evolução dos custos e movimentação de produto no pátio mostra as características da solução ótima do problema *IOSEP*. Com isso, os experimentos realizados nessa Seção permitiram validar o modelo, contudo existe a limitação do tamanho de problema que será abordado na próxima Seção usando uma técnica LRBH.

4.2.2 Soluções sub-ótimas do *IOSEP* usando o algoritmo LRBH

Para resolver o *IOSEP* descrito pelas Equações (2.1) - (2.12), considerando o planejamento energético do pátio de pequeno porte num horizonte de planejamento de longo prazo e com vários produtos, propõe-se nesta Tese a Heurística Baseada em Relaxação Linear (HBRL). Esta heurística resolve em sucessivas iterações o modelo matemático relaxado LP (excluindo o conjunto de restrições (2.11) e incluindo as restrições (3.1)).

As instâncias utilizadas para comparar as soluções exatas com as obtidas por meio da heurística LRBH foram apresentadas na Tabela 7.

Durante a calibração da técnica e observação de resultados preliminares verificou-se que essa heurística ficou muito lenta. No entanto, esse problema foi superado ao propor um novo parâmetro como limite inferior dessa relaxação. Se o limite for próximo a 0,5 (mas nunca menor ou igual a 0,5), o número de iterações pode ser menor, mas a solução pode estar muito longe da solução ótima.

Após algumas rodadas de calibração, o valor de 0,7 foi definido como limite. Se o limite for menor que 0,5 na primeira rodada, a restrição definida pela Equação (2.10)

poderá ser violada.

A Tabela 12 apresenta os resultados computacionais obtidos com a utilização da heurística LRBH para o *IOSEP*, onde esforço computacional é medido em segundos (ou fração de segundos) para que o *solver* CPLEX indique uma solução usando LRBH para cada instância.

Tabela 12 – Função objetivo e tempo de processamento da solução sub-ótima do *IOSEP*.

Instância	FO (Custo de Energia em 10^3 R\$)	Tempo Total LRBH (s)
1.1	44,3	0,015
1.2	64,0	0,125
1.3	80,4	0,172
1.4	116,9	1,812
1.5	182,0	5,251
1.6	1.861,4	3,969
1.7	2.048,4	7,14
1.8	2.725,8	23,098
1.9	3.690,4	21,785
1.10	4.504,2	115,655
1.11	6.211,7	114,401
1.12	8.282,4	422,914
1.13	13.796,3	854,06
1.14	15.544,2	3378,492
1.15	18.646,6	4249,165
1.16	*	-

*O CPLEX foi interrompido devido à falta de memória computacional.

Diante do exposto, é possível verificar que a técnica foi capaz de resolver instâncias maiores do que aquelas resolvidas de maneira exata, uma vez o CPLEX não obteve a soluções ótimas das Instâncias 1.14 e 1.15 por falta de memória da máquina.

Por sua vez, o LRBH obteve soluções para o problema até a Instância 1.15. Embora o esforço computacional (tempo de execução) até a instância 1.12 usando esta heurística tenha sido maior do que a solução exata do MILP, a Instância 1.13 alcançou uma solução aproximada com um esforço computacional inferior. Indicando que para problemas de porte médio a tendência é que o crescimento do esforço computacional do uso da heurística não cresça de forma tão acelerada como no MILP.

A Figura 13 apresenta a comparação entre os custos obtidos após a programação ser realizada por meio do LBRH e da solução exata do modelo MILP. Observa-se a proximidade entre as soluções e a aderência da metodologia.

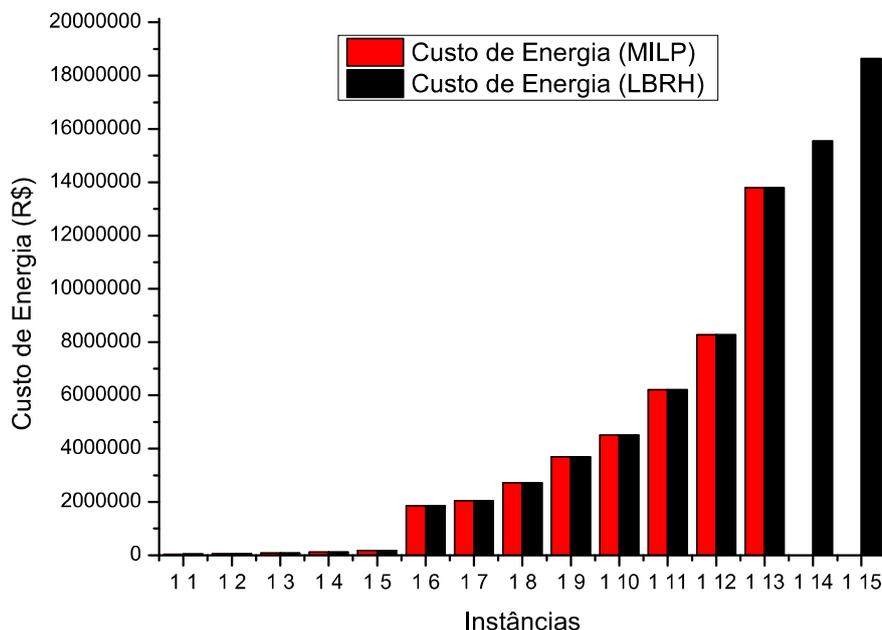


Figura 13 – Custos de energia fornecidos pelas soluções ótima e sub-ótima do IOSEP.

De forma mais clara, a Tabela 13 mostra a coluna *gap* – LRBH / MILP, para comparar a solução LRBH com a solução ótima para cada instância proposta.

Tabela 13 – Distância (*gap*) entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema IOSEP.

Instância	<i>gap</i> -LRBH /MILP (%)	Iterações
1.1	46,292	1
1.2	5,165	4
1.3	0,040	1
1.4	0,170	4
1.5	0,218	7
1.6	0,001	3
1.7	0,003	4
1.8	0,000	2
1.9	0,001	4
1.10	0,000	5
1.11	0,000	2
1.12	0,000	4
1.13	0,000	2
1.14	-	3
1.15	-	3
1.16	-	-

*O CPLEX foi interrompido devido à falta de memória computacional.

A técnica LRBH permitiu encontrar soluções com proximidade significativa da solução ótima, especialmente para instâncias maiores, conforme observado a redução do

gap entre as técnicas a medida que a instância aumenta. Este é um fator importante para possibilitar o uso da técnica em problemas maiores que não podem ser resolvidos pelo MILP.

Mesmo para instâncias maiores, com um maior horizonte de planejamento e quando ocorre alteração no padrão de redução dos valores do gap, como observado nas Instâncias 1.4 e 1.5, o gap ainda está abaixo de 0,5%, garantindo a qualidade da solução proposta pela técnica.

Para uma comparação visual, o LRBH começa relaxando o modelo MILP e incluindo um limite inferior e superior para as variáveis binárias. Após esses procedimentos, o LP é resolvido e a solução do LP é alcançada para esta primeira rodada. Veja a Figura 14 que apresenta a solução do LP na primeira iteração do LBRH da Instância 1.1.

	Período 1	Período 2	Período 3
	Produto 1 Produto 2 $f_{11}^1 = 1$ $f_{21}^1 = 0$	Produto 1 Produto 2 $f_{12}^1 = 0,03$ $f_{22}^1 = 0,97$	Produto 1 Produto 2 $f_{13}^1 = 0,03$ $f_{23}^1 = 0,97$
Pátio 1	$f_{11}^1 = 1$ $f_{21}^1 = 0$	$f_{12}^1 = 0,03$ $f_{22}^1 = 0,97$	$f_{13}^1 = 0,03$ $f_{23}^1 = 0,97$
Pátio 2	$f_{11}^2 = 1$ $f_{21}^2 = 0$	$f_{12}^2 = 0,44$ $f_{22}^2 = 0,56$	$f_{13}^2 = 0,99$ $f_{23}^2 = 0,01$

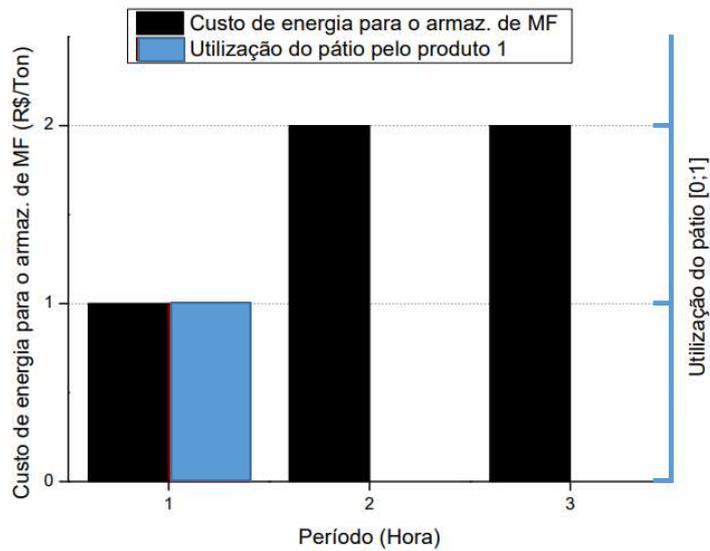
Figura 14 – Definição do valor 1 das variáveis relaxadas após a primeira rodada do modelo LP. Os círculos verdes são a variável definida como 1, porque são maiores que o limite (0,7), e o círculo preto é a variável que será definida como 1 porque é a maior variável abaixo do limite.

Após definir as variáveis binárias para 1, o modelo é atualizado com essas informações e o modelo LP é resolvido novamente. Na Instância 1.1, uma solução para o problema IOSEP é encontrada nesta iteração (consulte a Figura 15). Para a mesma instância, na Figura 14, todos os pátios possuem um produto designado nesta rodada, portanto, espera-se encontrar uma solução na próxima rodada. Se houvesse outro produto designado para o pátio 2 no período 2, seria impossível garantir a solução na próxima iteração, pois a restrição (2.10) não seria satisfeita.

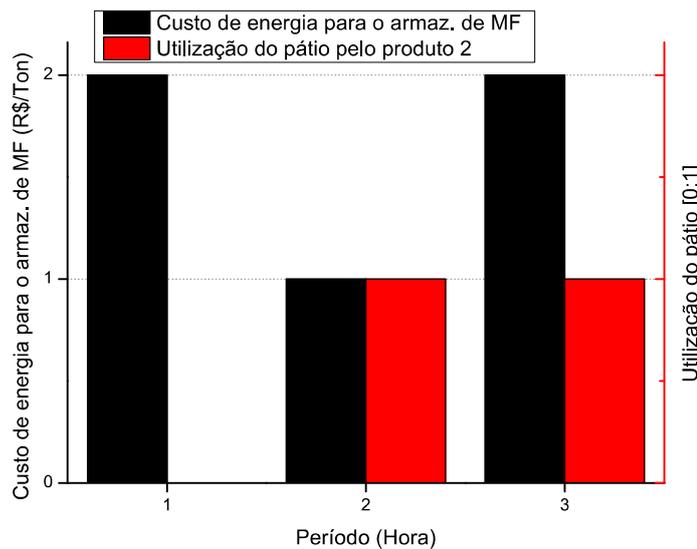
	Período 1	Período 2	Período 3
Pátio 1	$f_{11}^1 = 1$	$f_{22}^1 = 1$	$f_{23}^1 = 1$
Pátio 2	$f_{11}^2 = 1$	$f_{22}^2 = 1$	$f_{13}^2 = 1$

Figura 15 – Após atribuir o valor 1 a algumas variáveis, houve outra rodada de LP com as alterações, encontrando uma possível solução para este *IOSEP*. Quando o produto 1 é designado para estoque, a variável é representada em azul, caso contrário, se o produto 2 é designado para estoque, a variável é representada em vermelho.

A Figura 16 apresenta a evolução do custo de energia para armazenamento do minério de ferro (MF) do produto 1 no pátio em relação ao tempo, mostrando assim as escolhas do LBRH ao longo do tempo em relação à alocação de produtos no pátio. O custo variável ocorre pela indicação que alguns momentos do dia o custo energético pode ter uma variação e a movimentação nestes momentos pode ser adiada ou antecipada, em caso da utilização de rotas, ou antecipada a movimentação do minério, em caso de um pátio, caso este demonstrado para a Instância 1.1.



(a)



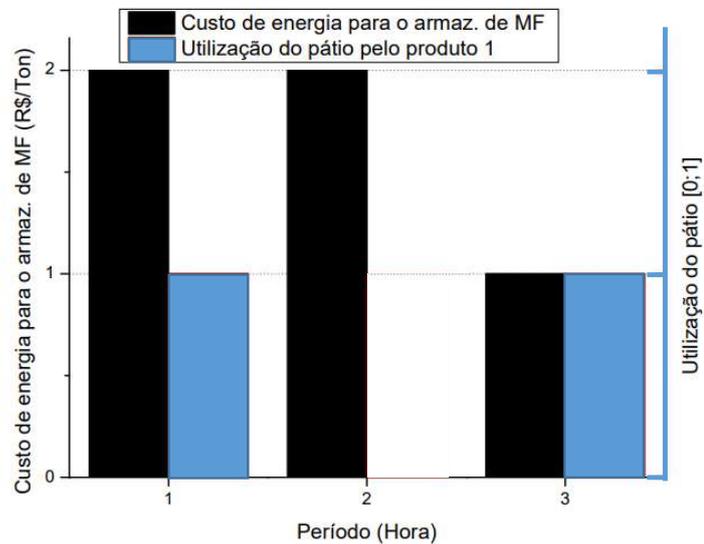
(b)

Figura 16 – Relação entre custo de energia e utilização do pátio 1 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b), da solução sub-ótima do *IOSEP* na Instância 1.1, onde MF=minério de ferro.

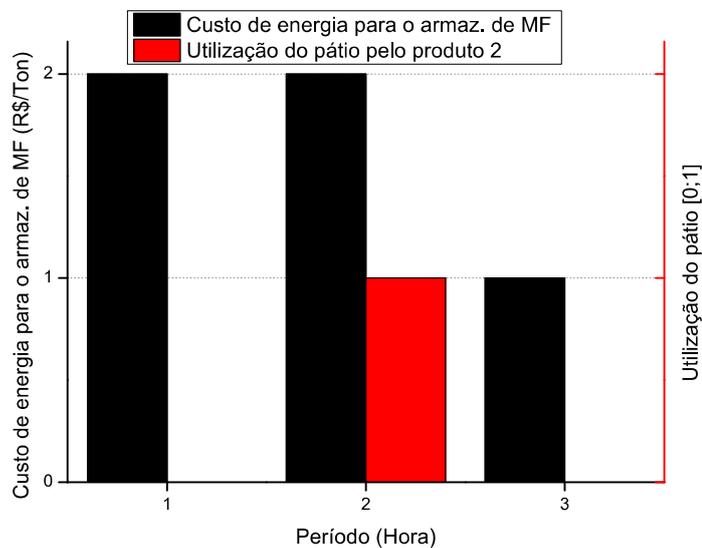
É importante ressaltar que o LRBH privilegiou em movimentar para os pátios o produto com o menor custo envolvido, assumindo o armazenamento no período 1 do produto 1 e nos períodos 2 e 3 do produto 2. No caso do terceiro período, com o mesmo valor de custo para os dois produtos foi preferido manter o produto 2 em estoque.

Para o pátio 2 é feita análise semelhante na Figura 17, com a observação de duas mudanças na escolha do produto armazenado. No período 2 o produto 1 é substituído e

no período 3 o produto 2 é substituído para voltar para o produto 1. A mesma mudança é apresentada na Figura 15, sem a comparação com o custo alterando no horizonte de tempo.



(a)



(b)

Figura 17 – Relação entre custo de energia e utilização do pátio 2 pelo produto 1 em (a) e produto 2 em (b), da solução sub-ótima do *IOSEP* na Instância 1.1, onde MF=minério de ferro.

Quando o modelo é resolvido para a Instância 1.1 de maneira ótima pela técnica exata, não são observadas alterações para o produto 1 e para o produto 2 na sua alocação no pátio, conforme pode ser observado na Figura 11, na Figura 14 e na Figura 16, no

que concerne a utilização do pátio 2. A Figura 11 e a Figura 15 já apresentam que existe uma diferença entre as duas soluções, uma das razões que, neste caso, leva a uma maior amplitude no *gap*. A Figura 9 mostra que a utilização do pátio ocorre exclusivamente para o produto 1.

Em problemas onde a função objetivo é a minimização, resolver a relaxação linear fornece um limite inferior do valor ótimo do MILP (THANH; PÉTON; BOSTEL, 2010). Essa comparação indica que quando não é possível obter o valor do MILP para comparação comparar a proximidade da solução obtida com o LP permitirá ter conclusões a respeito da proximidade da solução. Essa comparação pode ser observada na Tabela 14. Os casos da Instância 1.14 em diante podem ser avaliados usando a Equação (4.1) para comparar as soluções do MILP e LRBH com a solução LP.

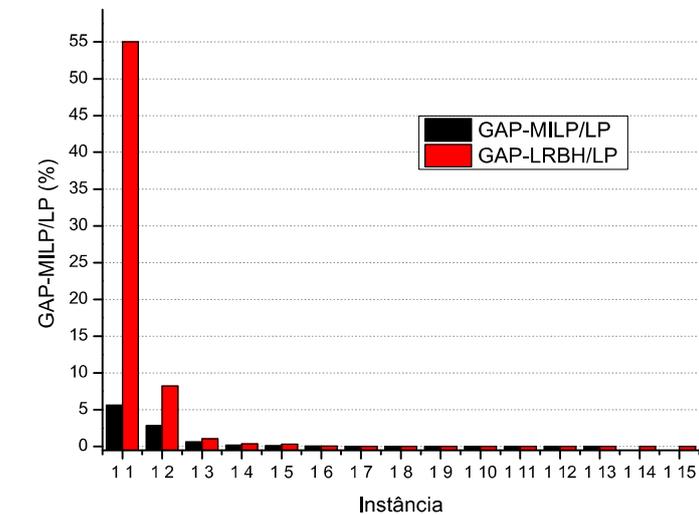
Tabela 14 – Distância entre os custos ótimo e sub-ótimo do problema IOSEP.

Instância	<i>gap</i> -MILP/LP (%)	<i>gap</i> -LRBH/LP (%)
1.1	5,623	55,009
1.2	2,820	8,217
1.3	0,635	1,038
1.4	0,191	0,361
1.5	0,108	0,326
1.6	0,031	0,041
1.7	0,007	0,010
1.8	0,001	0,001
1.9	0,000	0,001
1.10	0,005	0,005
1.11	0,000	0,000
1.12	0,000	0,000
1.13	0,000	0,000
1.14	-	0,000
1.15	-	0,000

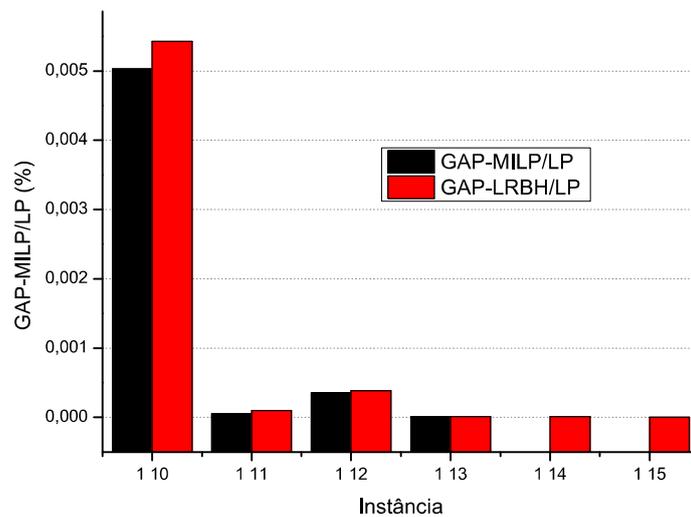
Os valores da Instância 1.1 à Instância 1.13 indicam que a solução ótima para cada instância está sempre entre a solução LP e LRBH. A avaliação da qualidade da solução da LRBH pode ser verificada usando o *gap* entre as soluções da heurística e do LP, pois esta métrica assume um valor ainda menor ao longo do aumento do tamanho das instâncias. Desta forma, se o *gap* entre LRBH e LP diminuir, a solução do LRBH sempre tenderá a estar mais próxima da solução MILP.

Nos casos das Instâncias 1.13, 1.14 e 1.15, as soluções ótimas possuem *gap* próximos de 0%, garantindo a boa qualidade da solução, já que a técnica acaba por ser uma possível solução para o problema. A Instância 1.1 também apresenta comportamento diferente das demais quanto ao *gap*. Nesta instância o valor observado é muito maior do que as demais instâncias, dessa forma, para uma instância muito pequena, a técnica não apresenta resultados satisfatórios. Nos demais casos, os resultados alcançados se aproximaram

gradativamente da solução ótima, indicando convergência que valida e corrobora com o uso da técnica (ver Figura 18).



(a)



(b)

Figura 18 – *gaps* obtidos entre as funções objetivo fornecidas pelo MILP, LP e LRBH para o *IOSEP* nas instâncias 1.1 a 1.15 em (a) e com o detalhamento das Instâncias 1.10 a 1.15 em (b).

Uma observação importante para a verificação dos resultados é que o planejamento deve ser feito de forma adequada, a fim de evitar gastos excedentes com energia relacionados para manutenção de lotes de minério de ferro na recepção do sistema (nos

vagões aguardando descarregamento) ou gastos de energia devido a uma alteração nas características de um produto para atender a demanda (navios aguardando o carregamento dos produtos).

Da mesma forma, esses resultados destacam períodos do horizonte de planejamento mais favoráveis para os procedimentos a serem realizados, indicando a viabilidade da utilização deste modelo matemático para problemas com dimensões pequenas e a LRBH para grandes dimensões, como as instâncias 1.14 e 1.15, cujos modelos MILP podem ser resolvidos de forma com o uso do *solver* comercial.

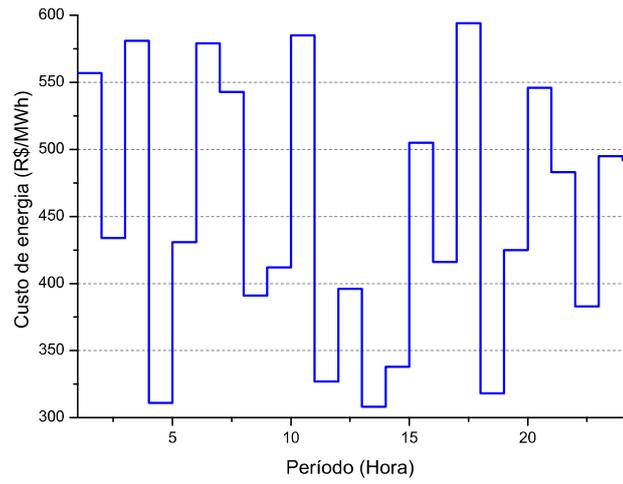
O modelo matemático adaptado de [Menezes, Mateus e Ravetti \(2017\)](#) para resolver o problema de planejamento do pátio, minimizando o custo de energia, permitiu que este problema fosse resolvido de forma ótima para as instâncias 1.1 a 1.13. Apesar de a LRBH chegar a uma solução, para essas instâncias, o MILP ainda foi capaz de encontrar a solução ideal para este problema. Em outras palavras, o tomador de decisão pode ter certeza de que uma decisão com essa técnica permitirá o planejamento eficiente de longo prazo do consumo de energia do pátio-porto de pequeno porte.

Desta forma, para alguns casos (Instâncias 1.1 a 1.13) solucionadores comerciais como o CPLEX ([IBM, 2013](#)) são capazes de resolver o problema com tempo computacional satisfatório, considerando a complexidade da tomada de decisão que deve ser tomada. A LRBH foi capaz de resolver as instâncias 1.1 a 1.15 e chegar a soluções próximas da solução ótima do problema nas instâncias 1.2 a 1.13, mostrando que esta técnica fornece um resultado satisfatório.

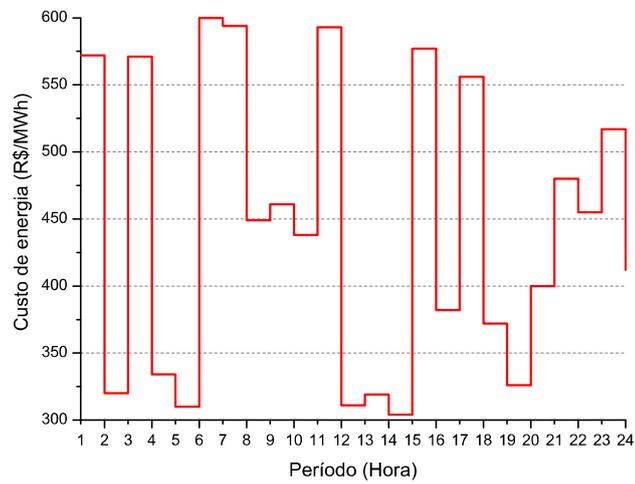
Por outro lado, para as Instâncias 1.1 a 1.13, o LRBH encontrou uma solução com um *gap* médio de 3,99% em relação à solução MILP. Se forem consideradas apenas as Instâncias 1.2 a 1.13, esse valor chega a aproximadamente 0,47%. Além disso, considerando as Tabelas [13](#) e [14](#), os valores de *gap* convergem conforme as instâncias se tornam maiores. As instâncias 1.14 e 1.15 não foram resolvidas com o MILP. Por esse motivo, foi comparado usando o *gap* entre o modelo LP e o LRBH.

4.3 Simulações do pátio de grande porte

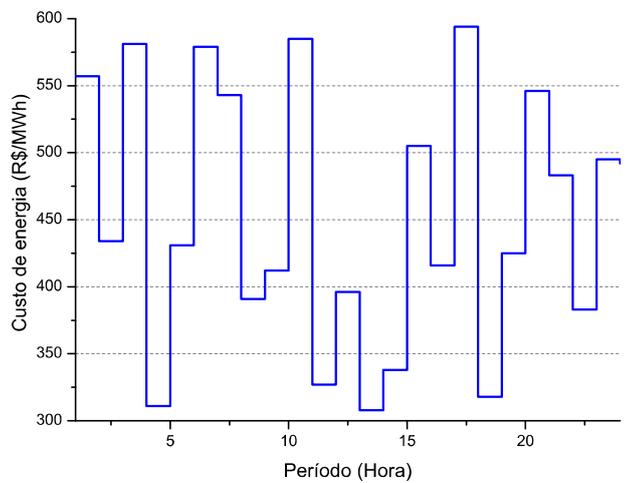
A Figura [19](#) apresenta o preço de venda de energia (R\$/KWh) previsto para os diferentes fornecedores de energia ao longo do Horizonte de Planejamento (HPI) de 24 horas, ou seja, um dia de planejamento de movimentação, alocação e carregamento de minério de ferro no sistema pátio-porto.



(a)



(b)



(c)

Figura 19 – Preço de venda de energia do Fornecedor 1 (a), Fornecedor 2 (b) e Fornecedor 3 (c) do pátio-porto de grande porte ao longo do HPI de 24 hs.

Já a Figura 20 apresenta a disponibilidade de energia elétrica por cada fornecedor ao longo do HPI para o planejamento energético do pátio-porto de grande porte.

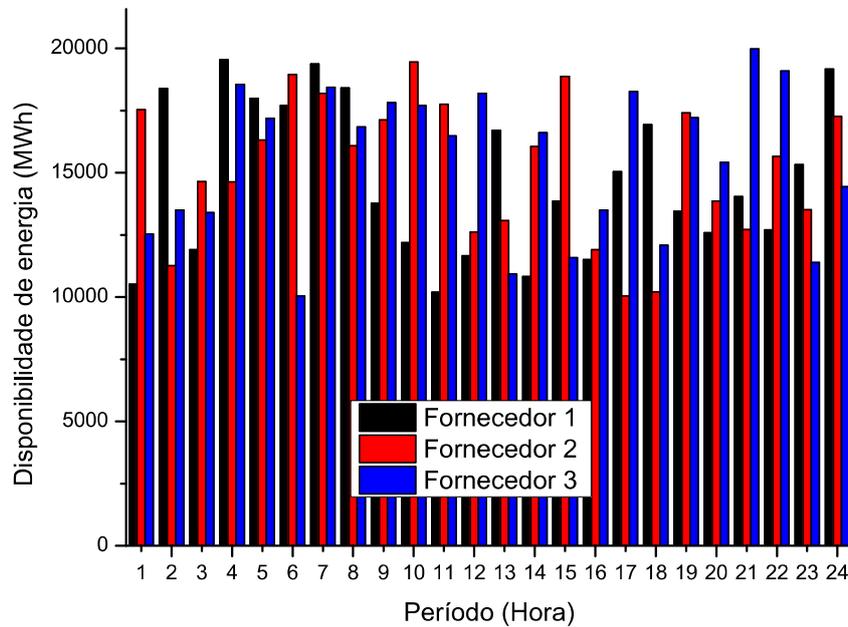


Figura 20 – Matriz energética do pátio-porto de grande porte ao longo do HPI de 24 hs.

Tanto as soluções exatas do modelo MINLP dos problemas $IOSEP_{mes}$ e $IOSEP_{mesb}$, aplicados no gerenciamento energético do pátio-porto de grande porte, quanto as soluções aproximadas usando o horizonte de rolagem, foram implementados na linguagem Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2015) com o auxílio do pacote de biblioteca CPLEX(IBM, 2013).

4.3.1 Soluções ótimas do $IOSEP_{mes}$

Seja o modelo matemático $IOSEP_{mes}$ proposto na Seção 2.3 e considere as transformações usadas para linearização dos modelos propostos na Seção 2.5. Considere as informações das Tabelas 8, 9 e 10 utilizadas para gerar as instâncias propostas para implementação do modelo $IOSEP_{mes}$. A Tabela 15 mostra o esforço computacional medido em segundos (ou fração de segundos) para o *solver* CPLEX atingir a solução ótima do modelo MINLP sem o horizonte de rolagem, a qual é chamada de solução em batelada.

Tabela 15 – Função objetivo e tempo de processamento das instâncias do *IOSEPmes*.

Instância	FO (Custo de Energia em milhares de R\$)	Tempo (s)
2.1	368,10	0,02
2.2	879,07	0,08
2.3	2.663,68	0,14
2.4	5.036,72	0,67
2.5	7.544,81	0,69
2.6	1.404,74	0,09
2.7	2.591,86	0,19
2.8	6.266,24	0,81
2.9	10.352,46	2,02
2.10	14.968,27	2,31
2.11	2.146,05	0,20
2.12	4.483,98	0,44
2.13	9.535,87	1,64
2.14	17.050,73	3,64
2.15	24.524,30	5,31
2.16	4.299,46	3,75
2.17	9.273,55	15,55
2.18	18.875,66	34,17
2.19	32.946,02	41,98
2.20	48.736,54	199,48
2.21	-	*
2.22	-	*
2.23	-	*
2.24	-	*
2.25	-	*

*O CPLEX foi interrompido por falta de memória computacional.

O modelo foi capaz de resolver as instâncias 2.1-2.20 respeitando as suas restrições e as características do pátio-porto estudado, mas também observa-se que as Instâncias 2.21-2.25 não pôde ser resolvida por falta de memória computacional.

O crescimento do valor da FO dentro de cada grupo de instâncias é explicado pelo aumento da demanda de clientes e produtos, bem como um maior fluxo entre os equipamentos. Observa-se também que o tempo de execução geralmente aumenta à medida que as instâncias se tornam mais complexas, resultando em valores que ultrapassavam 2 minutos de execução até que o processamento da solução não seja concluído por falta de memória. Embora existam tempos muito superiores ao tempo de processamento das instâncias menores, é importante destacar que as instâncias maiores apresentam um tempo satisfatório para a tomada de decisão no problema *IOSEPmes* em tempo real.

De maneira específica, a Figura 21 apresenta o resultado obtido para a Instância 2.15. Nestes casos, todas as Instâncias foram solucionadas e selecionados os fornecedores de energia que serão utilizados em cada período. Considerando estes três possíveis fornecedores de energia, essa Instância mostra uma alteração destes fornecedores em cada período, devido aos custos envolvidos ou a disponibilidade de energia por parte da matriz energética.

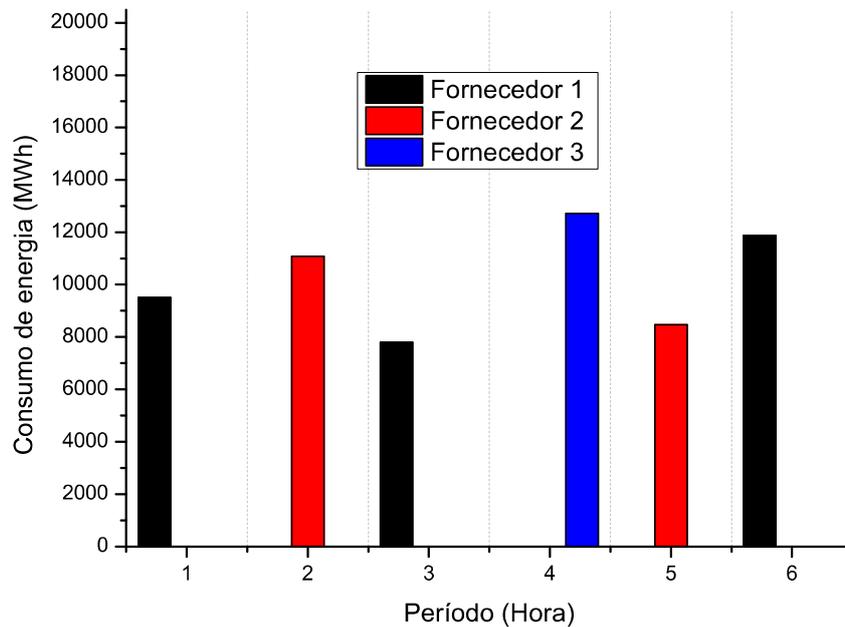


Figura 21 – Matriz energética obtida pela solução ótima do *IOSEPmes* na Instância 2.15.

De maneira semelhante, a Figura 22 apresenta a matriz energética para o problema *IOSEPmes* obtida para a Instância 2.19. Neste caso, observa-se que todos fornecedores de energia estão presentes na matriz energética determinada ao longo do Horizonte de Planejamento de 12 horas. É importante ressaltar que o modelo indica estas escolhas a partir da melhor combinação possível entre os preços de venda de energia ofertados associados com a quantidade consumida e a disponibilidade, o que pode ser verificado quando comparamos o resultado com a disponibilidade de energia por cada fornecedor e seu respectivo preço de energia.

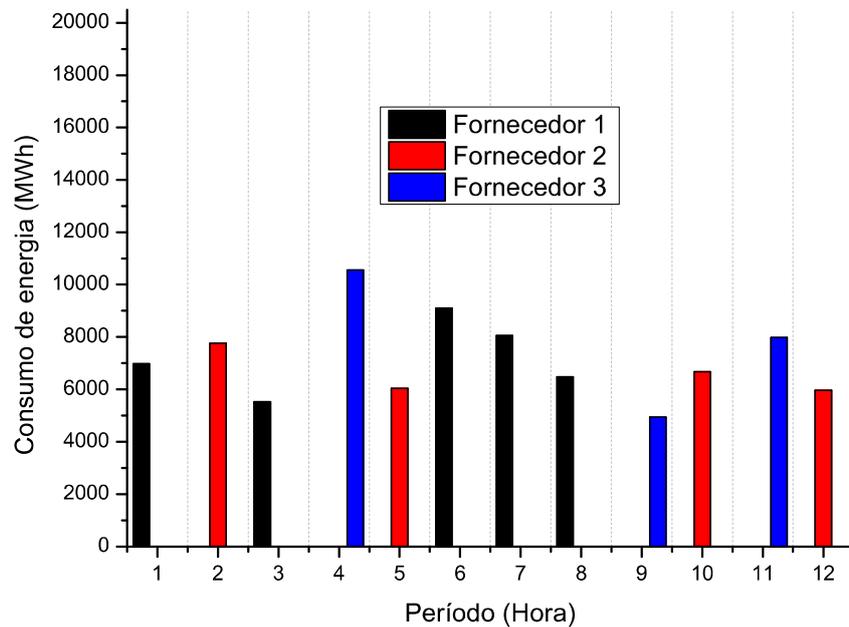


Figura 22 – Matriz energética obtida pela solução ótima do *IOSEPmes* na Instância 2.19.

As soluções ótimas obtidas mostram que a diversificação da matriz depende das características dos parâmetros do modelo, ou seja, da disponibilidade de energia, da demanda energética dos equipamentos do pátio, etc.

As Figuras 23 e 24 apresentam características da solução ótima quanto a fluxo de minério de ferro no sistema, a partir da carga total transportada pelos equipamentos até os pátios e navios e o percentual de ocupação dos pátios com minério ao longo do tempo para a Instância 2.19.

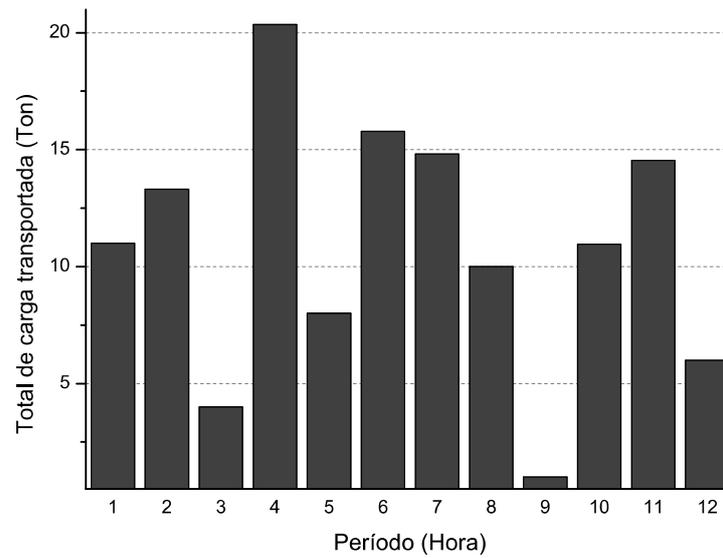


Figura 23 – Total de minério transportado no pátio-porto de grande porte fornecido pela solução ótima do *IOSEPmes* na Instância 2.19.

O minério que entra no sistema na Instância 19 não representa uma grande ocupação do pátio, atingindo uma ocupação de em torno de 22% no primeiro período e vai decrescendo ao longo do tempo, como pode ser visto na Figura 24. É fundamental observar que esse resultado ocorre devido a uma minimização de custos, uma vez que não está incluído na previsão os períodos seguintes ao horizonte, é preferível que seja mantido em estoque apenas o que vai ser utilizado, o que se explica o fato de no último período o sistema estar vazio.

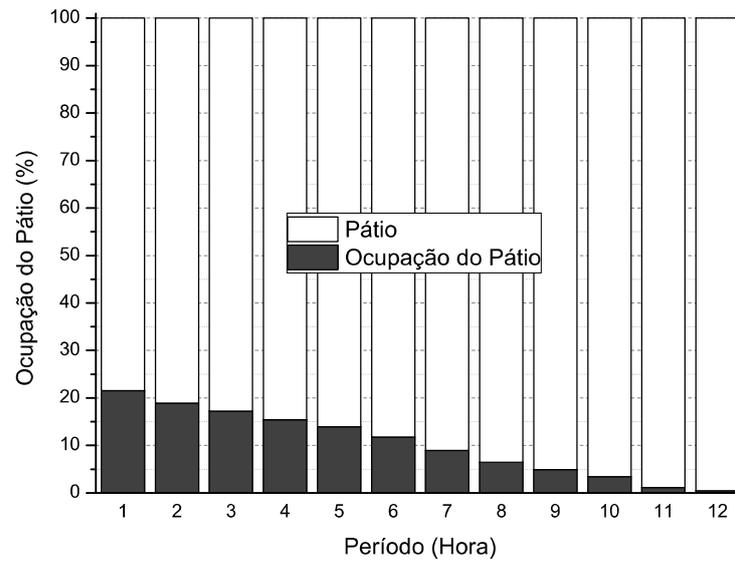


Figura 24 – Total de minério no pátio-porto de grande porte obtido pela solução ótima do *IOSEPmes* na Instância 2.19.

4.3.2 Soluções ótimas do *IOSEPmesb*

Seja o *IOSEPmesb* representado pelas equações (2.41); (2.14) - (2.28); (2.42) - (2.45); (2.29); (2.30); (2.46). As instâncias propostas na Tabela 10 foram simuladas para o sistema pátio-porto com múltiplos fornecedores de energia e com a possibilidade de utilização de baterias. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 – Custo ótimo e tempo de processamento das instâncias do *IOSEPmesb*.

Instância	FO (Custo de Energia)	Tempo (s)	Economia (%)
2.1	368,10	0,05	0
2.2	879,07	0,14	0
2.3	2.663,68	0,27	0
2.4	5.036,72	0,48	0
2.5	7.544,81	0,78	0
2.6	1.249,06	0,13	11,08
2.7	2.358,09	0,3	9,02
2.8	5.815,42	1,05	7,19
2.9	9.737,85	1,39	5,94
2.10	14.338,08	3,39	4,21
2.11	1.742,42	0,34	18,81
2.12	3.773,78	0,97	15,84
2.13	8.215,26	4,86	13,85
2.14	14.632,88	9,7	14,18
2.15	21.346,78	6,23	12,96
2.16	3.521,09	159,77	18,10
2.17	7.815,41	334,09	15,72
2.18	16.053,76	427,72	14,95
2.19	28.495,18	833,9	13,51
2.20	44.365,06	1.398,25	8,97
2.21	*	*	-
2.22	*	*	-
2.23	*	*	-
2.24	*	*	-
2.25	*	*	-

*O CPLEX foi interrompido por falta de memória computacional.

Verifica-se que a modelagem matemática é suficiente para resolver o problema de maneira ótima para as instâncias 2.1-2.20 com o *solver* comercial CPLEX (IBM, 2013), considerando um horizonte de planejamento finito, ofertas e demanda de energia elétrica. Entretanto, em casos reais outras complexidades são inseridas, tais como as alterações na oferta, na demanda, na disponibilidade de equipamentos e outras atividades que podem alterar seus parâmetros dentro do HPI.

Especificamente, a Instância 2.21 que é o objetivo principal desta tese, não pôde ser resolvida por falta de memória computacional. Para instâncias iguais ou maiores que esta recomenda-se a utilização de técnicas mais robustas a partir de heurísticas e metaheurísticas.

As Instâncias 2.1-2.5, que possuem um horizonte de planejamento de 2 horas, apresentaram resultados semelhantes ao modelo anterior (*IOSEPmes*), não indicando a necessidade de utilização de bateria. Esta situação era esperada, tendo em vista as Figuras 19 e 20. Note que elas apresentam os menores preços de energia até o horizonte de planejamento de 2 períodos e que a disponibilidade de energia é suficiente para atender à demanda.

A Figura 25 a seguir mostra a escolha da matriz energética considerando a solução ótima do problema *IOSEPmesb* resolvido para a Instância 2.15. Para esta mesma instância, a Figura 26 apresenta o estado de carga do banco de baterias, do inglês State of Charge (SOC), que representa o nível da bateria em determinado período. Observe que a dinâmica de carregamento e descarregamento da bateria ao longo do tempo pode acumular cargas em períodos consecutivos, como os períodos 4 e 5, para abastecer o sistema no período 6.

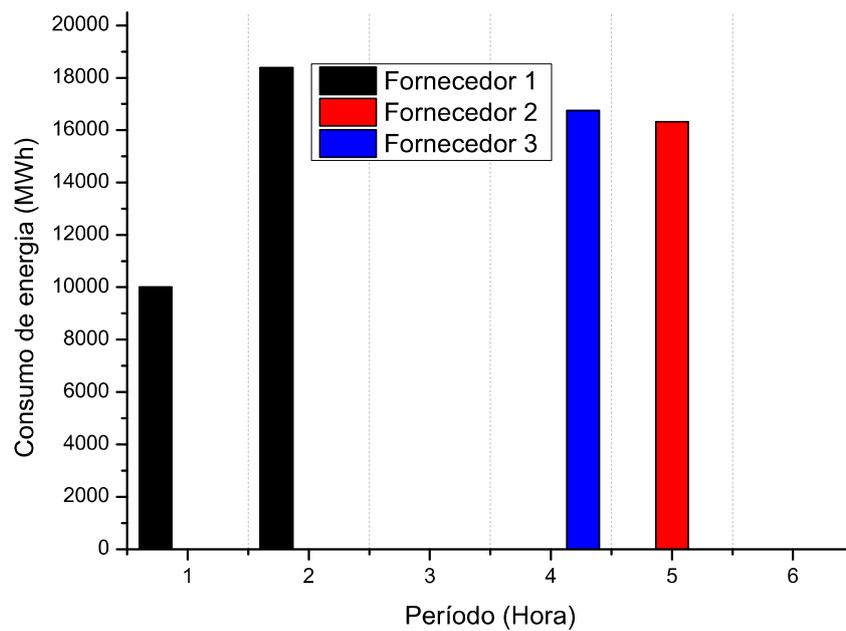


Figura 25 – Matriz energética obtida pela solução ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.15.

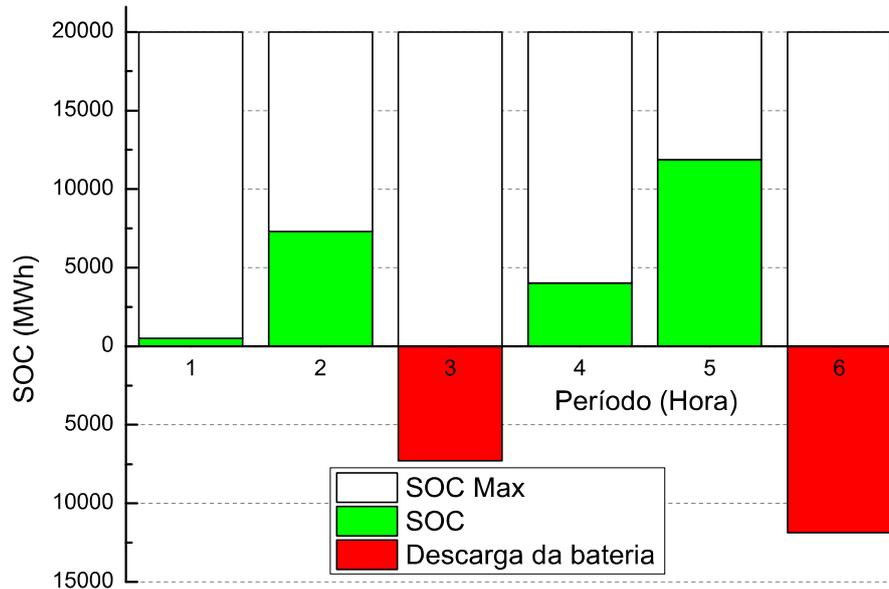


Figura 26 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução ótima *IOSEPmesb* na Instância 2.15.

De maneira específica, comparando a Figura 25 com a solução sem bateria apresentada na Figura 21, observa-se a troca do fornecedor de energia no período 2. Esta situação permitiu que o sistema fosse abastecido com uma quantidade ainda maior de energia devido a maior disponibilidade do Fornecedor 1 neste período (Veja Figura 20). Isto ocorreu mesmo que este fornecedor tenha custo um pouco mais elevado que o Fornecedor 2 que, porém, em uma visão global permite um menor custo total.

No que concerne a Instância 2.19, observe através das Figuras 27 e 28 que a solução ótima do problema *IOSEPmesb* indica que a bateria deve receber carga nos períodos 2, 4, 5 e 8 e que esta seja descarregada nos períodos 3, 6, 7, 9 e 10 para que fosse realizada a programação do sistema usando exclusivamente a bateria, conforme o objetivo proposto nesta Tese.

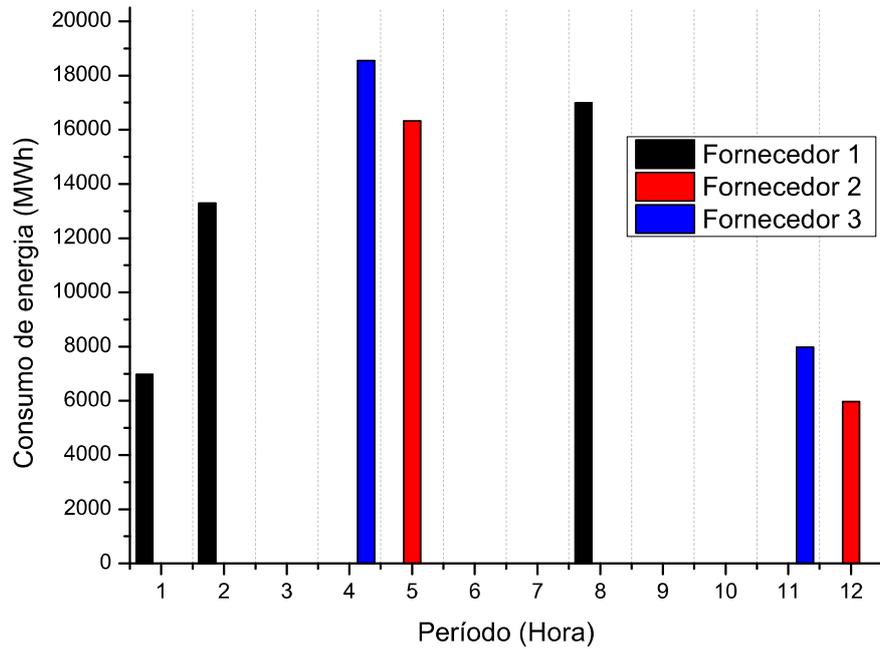


Figura 27 – Matriz energética obtida pela solução ótima do problema *IOSEP_{mesb}* na Instância 2.19.

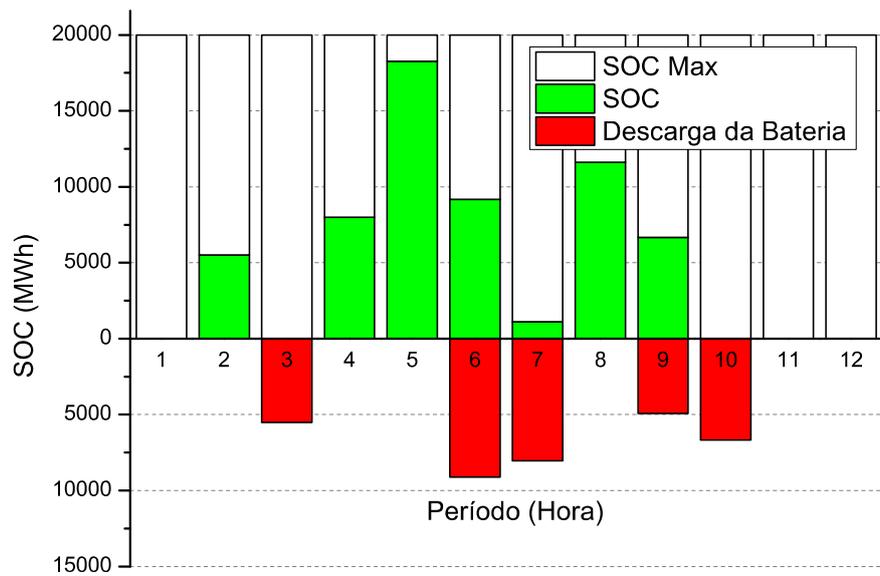


Figura 28 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução ótima do *IOSEP_{mesb}* na Instância 2.19.

De acordo com a Figura 29, obtida a partir da Tabela 16, verifica-se que as soluções ótimas do problema $IOSEP_{mesb}$ que apresentaram a maior economia de energia em relação ao $IOSEP_{mes}$ estão entre as instâncias 2.6-2.20, ou seja, apresentam horizonte de planejamento maior do que 4 horas. A abrangência do problema em relação a quantidade de produtos, bem como o horizonte de planejamento, já indica nestas instâncias que necessariamente as baterias serão utilizadas, pois há tempo hábil para que elas sejam carregadas, bem como um horizonte suficiente para realização da programação.

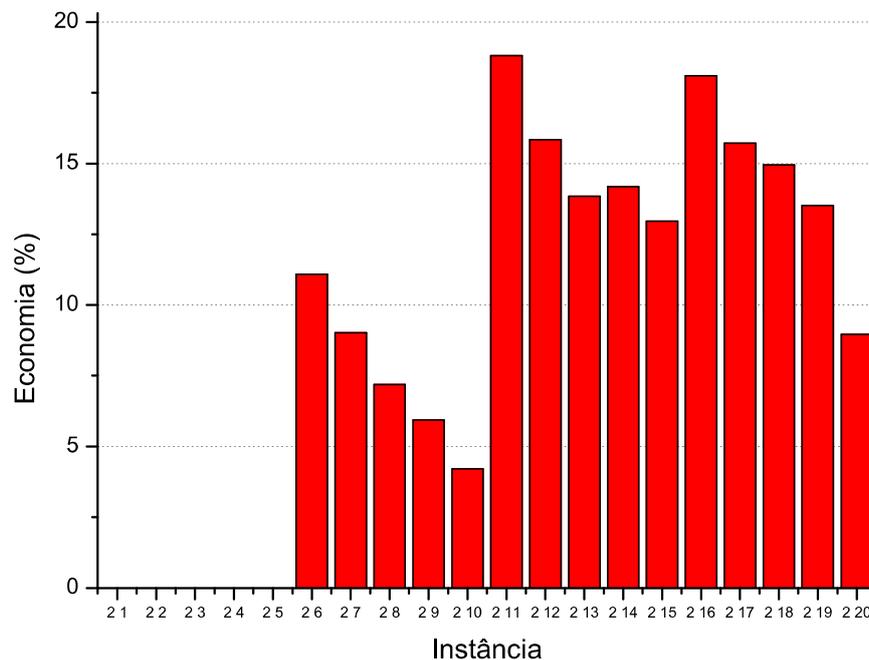


Figura 29 – Economia de energia no sistema pátio-porto de grande porte fornecida pela solução ótima do problema $IOSEP_{mesb}$.

Portanto, a gestão da matriz energética com o uso de bateria do pátio-porto de grande porte usando o modelo $IOSEP_{mesb}$, permite uma economia significativa, podendo superar os 15% em algumas instâncias. Considerando todas instâncias analisadas, a utilização de baterias apresenta uma média de redução de custos em torno de 9,22% e, se forem desconsideradas as Instâncias 2.1-2.5, esse valor pode atingir 12,29%.

Outra importante observação é que os planejamentos de movimentação de minério no sistema ao longo do tempo fornecido pelas soluções ótimas do $IOSEP_{mes}$ e $IOSEP_{mesb}$ foram semelhantes, com isso, foi possível identificar que o planejamento ótimo do sistema ocorre a partir da movimentação de material e, então, realiza-se a escolha da matriz energética.

Os modelos matemáticos propostos para os problemas $IOSEP_{mes}$ e $IOSEP_{mesb}$

foram capazes de resolver problemas com características de pátio de grande porte, mais complexo em relação ao pátio de pequeno-porte, cujo planejamento energético de longo prazo foi realizado através do modelo *IOSEP*. Assim, o pátio de grande porte está mais próximo dos casos reais encontrados nas grandes indústrias de mineração multinacionais. Assim, é possível propor modelos com múltiplas fontes de energia e baterias para estas indústrias e que não foram publicados na literatura.

Embora tenha-se essa evolução, uma importante característica de casos reais é a imprevisibilidade e a capacidade de adaptação dos parâmetros do modelo a estas alterações. Diante disso, a próxima Seção apresenta uma resolução dinâmica para estes problemas, com o incremento do horizonte de planejamento, bem como a alteração de características do sistema ao longo do tempo que permita realizar o gerenciamento de energia mediante a ocorrência de incertezas no sistema.

4.3.3 Soluções sub-ótimas do *IOSEPmes* e o *IOSEPmesb* usando a heurística baseada no HR

As soluções em batelada (ou exata) dos modelos MINLP para a instância 2.21 dos problemas *IOSEPmes* e *IOSEPmesb* não foram obtidas com um processador Intel Core i5 de 3,2 GHz com 8 GB de RAM. Porém, mesmo aumentando a memória computacional, as soluções ótimas obtidas para horizontes de planejamento até 12 horas podem não ser factíveis de serem aplicadas no gerenciamento de energia do pátio-porto real, devido a mudanças imprevisíveis ou incertezas que podem ocorrer em algum parâmetro de entrada deste sistema ao longo deste horizonte.

Portanto, esta Tese propõe utilizar a heurística baseada em HR, apresentado no Algoritmo 2, para resolver instâncias com tamanhos maiores que a Instância 2.20 e com incertezas quanto a operação e abastecimento do sistema pátio-porto. Para fazer a calibração do horizonte de previsão e a validação da técnica HR é fundamental comparar a solução em batelada, que é a solução ótima, com a solução utilizando o algoritmo de HR (Algoritmo 2), que é sub-ótima, para as Instâncias 2.19 e 2.20.

Assume-se que o Horizonte de Controle (HC) da heurística baseada em HR seja igual ao período de 1 hora e, portanto, a cada hora ocorrerá a atualização dos parâmetros e será realizada uma iteração para identificar o que será realizado quanto ao planejamento no período seguinte. Quanto ao Horizonte de Predição (HP) será feita uma análise entre os horizontes de 2, 4 e 6 horas para verificar qual deles é o mais adequado.

Para o modelo *IOSEPmes* dado por (2.41); (2.14)-(2.28); (2.42)-(2.45); (2.29); (2.30); (2.46), a Tabela 17 apresenta a coluna *gap*, onde a Equação (4.1) foi usada para calcular a distancia entre as soluções ótimas e sub-ótimas obtidas resolvendo o modelo MINLP em batelada e a heurística baseada em HR, respectivamente, para cada Instância.

Tabela 17 – *gaps* entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema *IOSEPmes*.

Instância	FO do MINLP (em 10^3 R\$)	HP (horas)	FO do HR (em 10^3 R\$)	<i>gaps</i>
2.19	32.946,0	2	34.317,6	4.163%
2.19	32.946,0	4	33.463,6	1.571%
2.19	32.946,0	6	33.318,9	1.132%
2.20	48.736,5	2	51.779,0	6.263%
2.20	48.736,5	4	50.521,2	3.662%
2.20	48.736,5	6	50.116,7	2.832%

Verificando os resultados da Tabela 17, é possível identificar que a FO do problema *IOSEPmes* obtida através da heurística baseada em HR com HP de 6 horas está mais próxima da FO fornecida pela solução ótima, devido ao horizonte maior permitir melhor planejamento dos recursos energéticos. Portanto, o HP escolhido da heurística baseada em HR é de 6 h. As simulações foram realizadas sem provocar alterações nos parâmetros do modelo, objetivando somente a calibração do HP desta heurística.

O mesmo procedimento foi realizado para calibrar o HP do algoritmo de HR com o modelo *IOSEPmesb* dado por (2.41); (2.14)-(2.28); (2.52); (2.53); (2.33); (2.34); (2.54); (2.36)-(2.38); (2.55)-(2.66); (2.38); (2.39); (2.67). Veja na Tabela 18 que a FO do problema *IOSEPmesb* obtida através da heurística baseada em HR com HP de 6 horas está mais próxima da FO fornecida pela solução ótima, e, portanto, o HP da heurística baseada em HR com o modelo *IOSEPmesb* também é de 6 hs.

Tabela 18 – *gaps* entre as soluções ótimas e sub-ótimas do problema *IOSEPmesb*.

Instância	FO do MINLP (em 10^3 R\$)	HP (horas)	FO do HR (em 10^3 R\$)	<i>gap</i>
2.19	28.495,2	2	29.828,3	4.678%
2.19	28.495,2	4	28.936,9	1.550%
2.19	28.495,2	6	28.936,9	1.550%
2.20	44.365,1	2	47.787,5	7.714%
2.20	44.365,1	4	45.239,3	1.970%
2.20	44.365,1	6	45.154,8	1.780%

4.3.3.1 Simulações do *IOSEPmes* e o *IOSEPmesb* com falhas nos equipamentos

De agora em diante apresentam-se os resultados computacionais das simulações das Instâncias 2.21 e 2.25 definidas na Tabela 10, onde se consideram perturbações aleatórias nos parâmetros do modelo MINLP do algoritmo de HR. Estas perturbações significam que um equipamento foi sorteado aleatoriamente para interromper o seu funcionamento, com o valor de sua capacidade (b^m) assumindo o valor 0, simulando uma quebra ou indisponibilidade de um equipamento.

Para tanto, desenvolveu-se um código na linguagem de programação Python (PYTHON SOFTWARE FOUNDATION, 2015) para gerar os dados de entrada e as

alterações, e implementou-se um modelo em um formato adequado para que o CPLEX (IBM, 2013) realize a otimização de cada uma das iterações, utilizando as configurações padrão deste solucionador. Este código na linguagem Python usa o pacote de bibliotecas CPLEX e suas funções, para executar o MILP e também para realizar os procedimentos de atualizações dos seus parâmetros.

A Tabela 19 compara os custos de energia obtidos resolvendo os problemas *IOSEPmes* e *IOSEPmesb*, respectivamente, para Instâncias 2.21 e 2.25 usando a heurística baseada em HR e considerando quebras aleatórias das máquinas do pátio-porto de grande porte.

Tabela 19 – Comparação das funções objetivos dos problemas *IOSEPmes* e *IOSEPmesb*, usando a heurística baseada em HR com HPI de 24 horas

Instância	Tipos de Produtos	<i>IOSEPmes</i>/<i>IOSEPmesb</i> (em 10³ R\$)
2.21	1	17.434,0/14.917,2
2.22	2	35.884,1/31.720,1
2.23	5	67.615,7/59.997,7
2.24	7	111.425,8/101.414,27
2.25	10	229.548,3/ 215.007,4

A partir da Tabela 19, mostra-se na Tabela 20 a economia no custo de energia percentual no pátio-porto de grande porte, considerando o banco de baterias quando comparado ao mesmo cenário sem baterias (ou seja, com incertezas e diferentes fornecedores de energia).

Tabela 20 – Economia de energia no sistema pátio-porto de grande porte fornecida pela solução sub-ótima do problema *IOSEPmesb*

Instância	Economia
2.21	17,881%
2.22	14,386%
2.23	10,042%
2.24	8,732%
2.25	7,676%

Da mesma forma que na solução em batelada, a solução sub-ótima através do HR possibilitou ganhos relacionados à economia de energia de até 17,88%, ou seja, instâncias com maior quantidade de produtos apresentam ganhos menores em porcentagem, mas com economia significativa.

As soluções em batelada das Instâncias maiores ou iguais a 2.21 não foram possíveis de serem obtidas pelo MINLP considerando o horizonte de planejamento 24 horas, ao contrário da heurística baseada em HR, onde as soluções sub-ótimas foram obtidas até a

instância 2.25. Este é uma característica importante que viabiliza o uso de heurísticas em problemas maiores que não podem ser resolvidos pelo MINLP.

Especificamente para a Instância 2.21 definida na Tabela 10, observa-se na Figura 30 que o descarregamento de energia da bateria ocorre em faixas de tempo em que o preço de venda de energia ofertada é mais alto, e que a pouca energia consumida pela bateria é característica da baixa movimentação de material, uma vez que a instância disponibiliza apenas um produto.

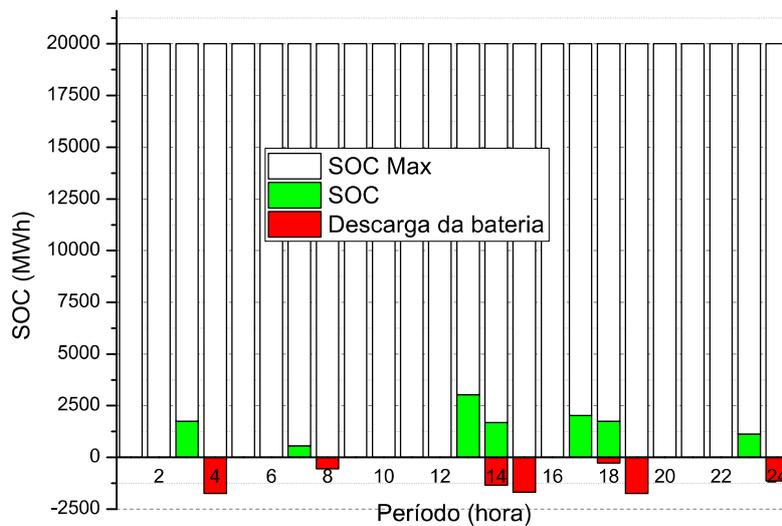


Figura 30 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.21.

Já a Instância 2.22 (Figura 31), apresenta uma maior frequência de carga/descarga da bateria em relação à Instância 2.21 devido ao aumento da quantidade de produtos. É possível identificar neste caso um comportamento semelhante ao anterior, sem necessidade de realizar grandes cargas/descargas da bateria. Como os casos reais apresentam uma maior diversidade de produtos, espera-se que em instâncias ainda maiores a carga/descarga de energia da bateria aumentem proporcionalmente. Note que essa instância apresenta característica de acúmulo de energia em dois períodos consecutivos, como se observa nos períodos 15 e 19, por exemplo.

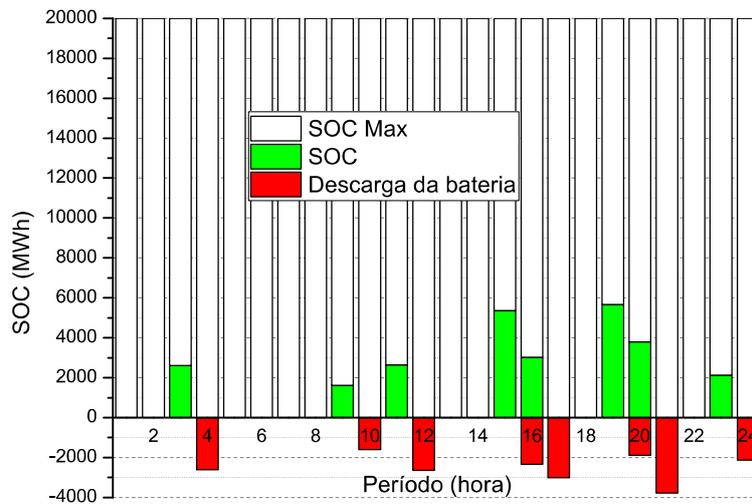


Figura 31 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.22.

Da mesma forma que a Instância 2.22, a Instância 2.23 apresenta uma utilização maior da energia da bateria. No entanto, essa instância apresenta nos períodos 22 e 23 a manutenção da carga elétrica (sem carga/descarga da bateria) indicando o armazenamento para atender uma demanda futura com um custo maior.

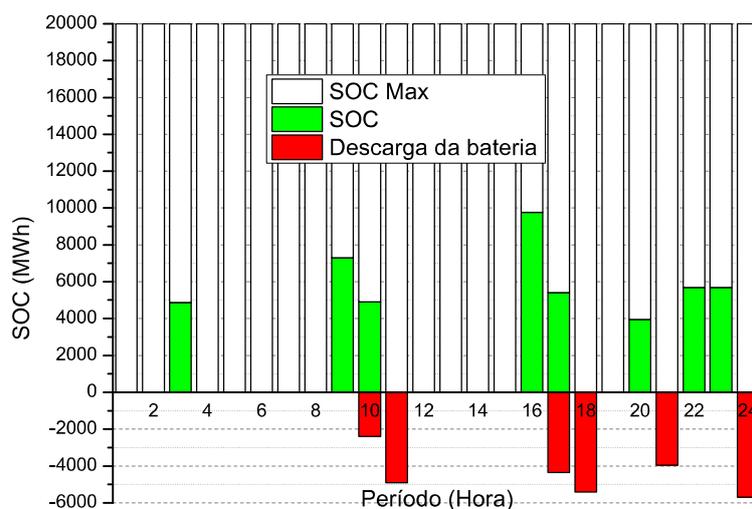


Figura 32 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.23.

A Instância 2.24 apresenta maiores armazenamentos e descargas de energia da bateria em relação às instâncias anteriores. Observe que nos períodos 19 e 20 a bateria recebeu carga para ser utilizada no período 21.

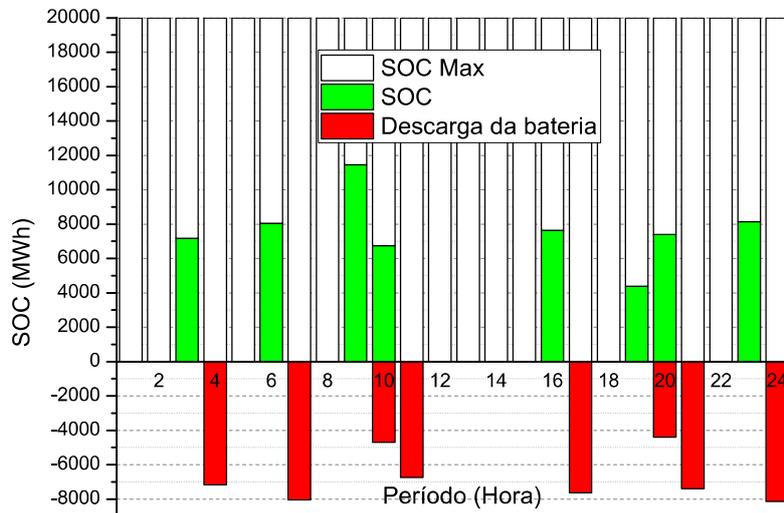


Figura 33 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.24.

A Instância 2.25, por sua vez, apresenta uma estratégia de gerenciamento de energia com maior utilização de carga da bateria ao longo do tempo, em relação a todas as instâncias anteriores. Essa instância apresenta nos períodos 2 e 3 a manutenção da energia da bateria (sem carga/descarga de energia) indicando o armazenamento para atender uma demanda futura quando o preço de oferta de energia for maior e, ainda, nos períodos 7 e 8 o abastecimento contínuo para ser gasto nos dois períodos seguintes.

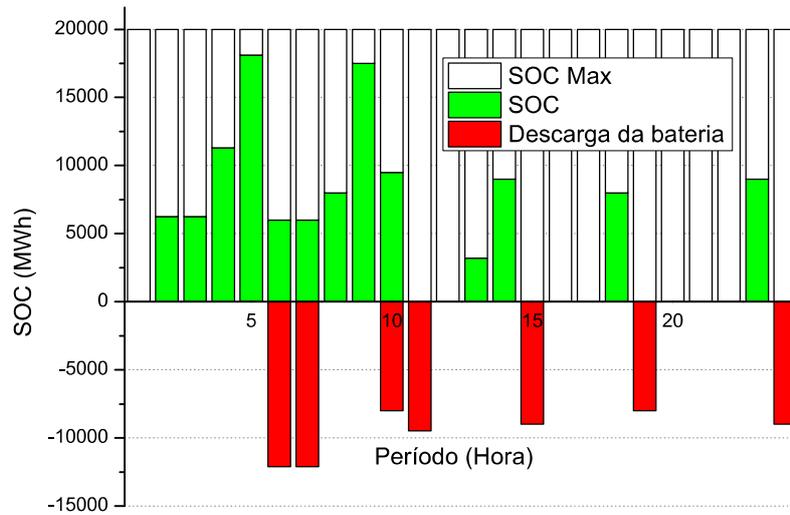


Figura 34 – Carga armazenada (SOC) e descarga de energia da bateria obtidos pela solução sub-ótima do *IOSEPmesb* na Instância 2.25.

A Figure 35 mostra o total de minério de ferro transportado no sistema pátio-porto de grande porte em cada período de planejamento para a Instância 2.25. Esta instância é a que possui o maior fluxo de minério de ferro, pois essa instância é a que apresenta maior quantidade de tipos de produtos diferentes que devem ser transportados no sistema pátio-porto durante o HPI.

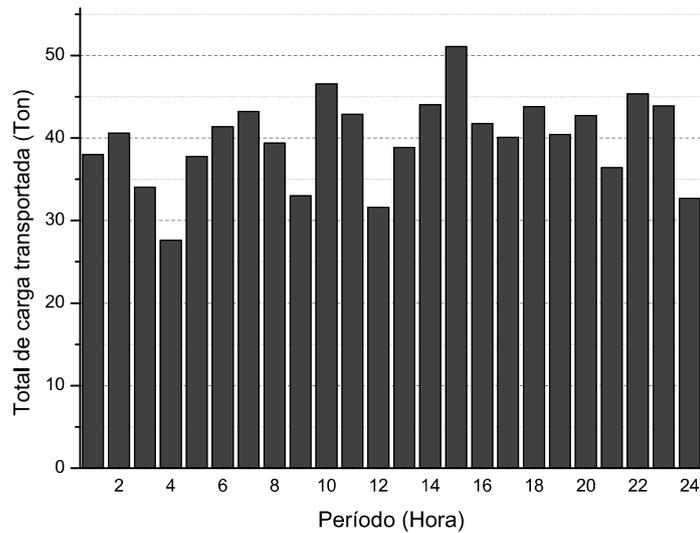


Figura 35 – Fluxo de minério transportado no pátio-porto de grande porte fornecido pela solução sub-ótima do *IOSEP_{mesb}* na Instância 2.25.

A Figura 36 mostra o percentual de ocupação dos pátios ao longo do tempo. Observa-se que a quantidade média de material estocado em cada período está em torno de 10 % da capacidade do pátio, uma vez que a maior parte do fluxo de minério é transportado da recepção para os navios, sem necessidade de realizar o armazenamento nos pátios.

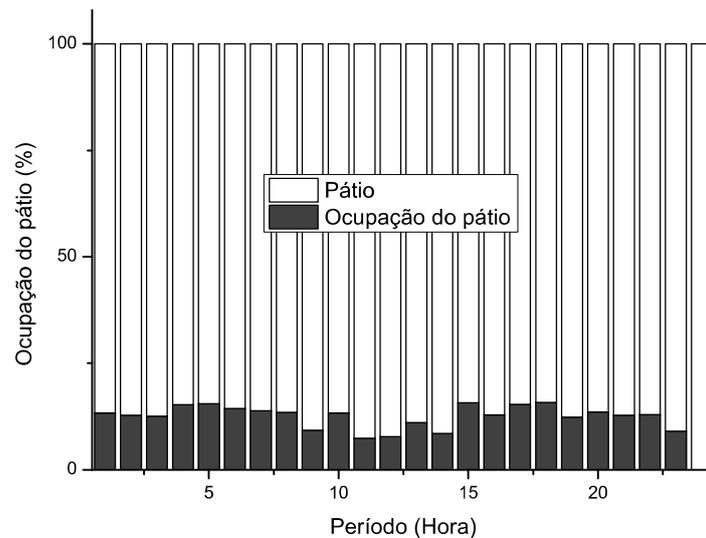


Figura 36 – Ocupação do pátio-porto de grande porte fornecido pela solução sub-ótima do *IOSEP_{mesb}* na Instância 2.25.

O tempo computacional da heurística baseada em HR para fornecer a solução do

problema *IOSEPmesb* em cada iteração é de 5 segundos. Este tempo é pequeno para o gestor aguardar o processamento dos resultados e em seguida fazer o planejamento de energia a cada hora.

De maneira geral observa-se que a utilização da capacidade da bateria está relacionada com o volume de material que é movimentado. Se o sistema que fizer uso dessa técnica movimentar uma quantidade maior e mais diversa de produtos deverá utilizar cargas/descargas da bateria ainda maiores. O conjunto de baterias considerado nesta proposta é suficiente para o sistema em questão, uma vez que o sistema não é carregado em sua totalidade.

Uma observação importante para a verificação dos resultados é que a heurística baseada em HR permite que a tomada de decisão e indicações de movimentação e alocação de minério ocorram de forma adequada, embora não se tenha atingido um padrão de comparação para as instâncias maiores, é possível supor que seja uma boa solução, conforme demonstrado para as demais instâncias.

É importante ressaltar que a execução do algoritmo baseado em HR resulta num estoque vazio no último período, tal como observa-se na Figura 36. Isto é o contrário do resultado obtido com a solução em batelada (veja Figura 24) onde após o final do planejamento o estoque está vazio.

Em geral, as soluções fornecidas pelo MINLP ou HR consideram a possibilidade de se modificar a estratégia de gerenciamento de energia sempre que ocorrerem mudanças imprevisíveis durante um determinado horizonte de planejamento. Dessa forma, essas técnicas poderiam ser utilizadas pelo gestor de energia para tomar decisões sob incertezas a curto, médio ou longo prazo.

5 Conclusão

Esta Tese propôs originalmente diferentes estratégias de gerenciamento de energia elétrica do sistema pátio-porto de minério de ferro de pequeno e grande portes. Estas estratégias se baseiam no planejamento adequado dos fluxos de minério de ferro presentes nas operações destes sistemas ao longo de diversas etapas, visando o menor custo de energia. O gerenciamento deve ser feito de forma eficiente, a fim de evitar gastos excedentes com energia relacionados à manutenção de lotes de minério de ferro na recepção do sistema (nos vagões aguardando descarregamento) ou gastos de energia devido a uma alteração nas características de um produto para atender a demanda (navios aguardando o carregamento dos produtos).

Uma das estratégias propostas, denominada *IOSEP*, foi aplicada a um sistema pátio-porto de pequeno porte, objetivando minimizar o seu consumo de energia a longo prazo (mais que 60 dias) usando o modelo MILP e a heurística baseada em relaxação linear (LRBH). O gerenciamento energético a longo prazo é fundamental para analisar a capacidade de atendimento do sistema elétrico do pátio-porto às demandas futuras, ou seja, possíveis demandas a serem contratadas. Nestes casos geralmente é necessário usar heurísticas para resolver o problema de otimização MILP já que não é possível obter soluções ótimas (em batelada).

Para analisar o desempenho da solução sub-ótima fornecida pelo LBRH em relação à solução ótima, foram simuladas algumas instâncias (1.1 até 1.13) variando gradualmente os diferentes tipos de produtos armazenados e o horizonte de planejamento do problema. Para estas instâncias, o *gap* obtido entre as soluções ótimas e sub-ótimas foi menor ou igual a 5,165%. Para instâncias maiores (1.14 e 1.15), onde não é possível obter solução exata, a solução alcançada pelo LBRH apresentou um *gap* muito próximo de 0,000% em relação ao LP.

Esta Tese propôs também outra estratégia de gerenciamento de energia de curto prazo (24 h), chamado de *IOSEPmes*, utilizada para determinar em tempo real (a cada hora) os fornecedores de energia de um sistema pátio-porto de grande porte, considerando incertezas operacionais nos parâmetros do modelo, dada uma demanda já contratada. A última estratégia, chamada *IOSEPmesb*, acrescenta à estratégia anterior a possibilidade de armazenamento de energia em baterias para ser usada nos períodos em que os preços de venda de energia são elevados. Os dois modelos são não lineares, tratando-se portanto de modelos MINLP, que para serem resolvidos foram linearizados. Porém, como o objetivo é fazer a gestão de energia de um pátio de grande porte com incertezas, foi proposto resolver este modelo MINLP por meio de heurística baseada em horizonte de rolagem (HR).

Para calibrar o horizonte de previsão do HR, foi realizada uma análise da solução ótima para instâncias de tamanhos pequeno e médio (Instâncias de 2.6 até 2.20), permitindo concluir que o uso de horizontes de planejamento do modelo MINLP maiores ou iguais a 6 horas proporcionam soluções ótimas com uma economia de energia devido ao uso da bateria variando de 8,97% até 18,81%, quando os diferentes tipos de produtos armazenados no pátio diminuem de 10 para 1. E comparando as soluções ótimas e sub-ótimas para instâncias de tamanho médio (Instâncias 2.19 e 2.20), as simulações numéricas mostraram que o *gap* entre estas soluções é menor que 6,23 %.

Portanto, foram analisadas instâncias ainda maiores que a Instância 2.20 considerando um sistema pátio-porto de grande porte sujeito a incertezas (falhas de máquinas) e diferentes fornecedores de energia. Observou-se que as soluções obtidas através da heurística baseada em HR com horizonte de previsão de 6 horas, apresentaram uma economia de energia com o uso da bateria variando de 7,67% até 17,81%, quando os diferentes tipos de produtos armazenados no pátio diminuem de 10 para 1.

O algoritmo HR, além de tratar as incertezas foi capaz de resolver problemas de grandes dimensões, devido a sua decomposição em sub problemas com horizontes menores (horizonte de predição), diminuindo assim as dimensões do problema original. Porém, este algoritmo tem a desvantagem de possuir grande complexidade de implementação em um sistema real, e em geral suas soluções dificilmente chegam ao ótimo global. Ao contrário, o LBRH é mais fácil de ser implementado num sistema real para se fazer o planejamento de longo prazo, e se os parâmetros do modelo são fixos chega-se ao ótimo global com mais facilidade. Por outro lado, é mais difícil garantir que o LBRH forneça boas soluções quando os parâmetros do problema sofrem variações em relação ao tempo. Isto se deve às incertezas inerentes do problema de gerenciamento de energia em curto prazo, e ao fato das regras de relaxação do LBRH terem que ser modificadas à medida que os parâmetros do modelo sofrem alterações.

Dessa forma, foram apresentadas técnicas que pudessem auxiliar o gerenciamento energético dos pátios visando maior eficiência em relação aos gastos com energia. Nos dias atuais essa característica é fundamental no contexto de escassez energética e uso indevido dos recursos naturais, permitindo uma organização de propor soluções usando fontes alternativas de energia que permita alcançar uma maior eficiência energética com a otimização dos recursos.

Todavia, o desenvolvimento contínuo de técnicas de solução que permitam desafiar a equalização de atendimento da demanda, vazão do sistema e custos envolvidos permitirá maior agilidade na tomada de decisão, aproximando de uma aplicação contínua em tempo real, algo fundamental na indústria 4.0.

5.1 Trabalhos futuros

Pesquisas futuras podem ser realizadas visando descrever modelos de gerenciamento de energia no pátio-porto ainda mais robustos como, por meio da utilização de um sistema de energia renovável na sua rede de energia. Desta forma seria possível avaliar a eficiência energética deste sistema com a utilização de energias eólica, solar e das marés, as quais são fontes promissoras em regiões próximas ao litoral. Também poderiam ser consideradas outras características operacionais importantes que impactam no custo de energia, como o giro de estoque, além de agregar ao modelo de *mix* de minérios de origem na mina para formar os diferentes produtos (tipos de minério) no pátio de estocagem.

Estudos futuros poderiam incluir uma análise da performance do *solver* a partir da alteração das suas configurações, para redução do uso da memória a fim de expandir o tamanho das instâncias. Além disso realizar um estudo de viabilidade financeira para execução do projeto de utilização de bancos de baterias, considerando a evolução da tecnologia e do preço dos equipamentos ao longo do tempo, a fim de validar e viabilizar a implementação desse sistema de armazenamento energético.

Sugere-se para trabalhos futuros a implementação da heurística HBRL no pátio de grande porte para o gerenciamento de energia no longo prazo. Quanto ao horizonte de rolagem, é importante que este algoritmo seja avaliado dentro de um simulador a eventos discretos do pátio-porto de grande porte, que represente de forma mais fidedigna as operações de um sistema real. Desta forma será possível comparar os impactos das incertezas operacionais nas soluções obtidas com o HR, e comparar estas soluções com outras técnicas de otimização baseadas em heurísticas e metaheurísticas.

Além disso, trabalhos futuros podem considerar a utilização diversas funções objetivo para uma abordagem multi-objetiva a fim de aproximar de casos reais e, também, poderiam ser exploradas arquiteturas de redes de energia inteligentes no sistema pátio-porto, que utilizem os conceitos da indústria 4.0, simultaneamente com os resultados de simulação e otimização para tomada de decisões sobre o gerenciamento de energia do pátio-porto em tempo real.

Referências

- ABDEKHODAEI, A. et al. Integration of stockyard and rail network: a scheduling case study. In: *proceedings of the fifth Asia Pacific industrial engineering and management systems conference, Gold Coast, Australia*. [S.l.: s.n.], 2004. Citado na página 27.
- AGO, M.; NISHI, T.; KONISHI, M. Simultaneous optimization of storage allocation and routing problems for belt-conveyor transportation. *J. Adv. Mech. Des. Syst. Manuf*, Taylor & Francis, v. 1, n. 2, p. 250–261. <https://doi.org/10.1080/17480930.2019.1579693>, 2007. Citado na página 25.
- AS'AD, R.; DEMIRLI, K. Production scheduling in steel rolling mills with demand substitution: Rolling horizon implementation and approximations. *International Journal of Production Economics*, Elsevier BV, v. 126, n. 2, p. 361–369, ago. 2010. Citado na página 51.
- BALLIAUW, M.; KORT, P. M.; ZHANG, A. Capacity investment decisions of two competing ports under uncertainty: A strategic real options approach. *Transportation Research Part B: Methodological*, Elsevier, v. 122, p. 249–264, 2019. Citado na página 28.
- BALLIAUW, M. et al. Towards improved port capacity investment decisions under uncertainty: a real options approach. *Transport Reviews*, Taylor & Francis, v. 39, n. 4, p. 531–552, 2019. Citado na página 28.
- BAZ, O. E. *The role of the mining industry in the energy transition*. 2021. Disponível em: <<https://infomineo.com/mining-industry-in-energy-transition/>>. Citado na página 25.
- BELOV, G. et al. Local search for a cargo assembly planning problem. In: *Integration of AI and OR Techniques in Constraint Programming*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014. p. 159–175. Citado na página 26.
- BELOV, G. et al. *Exploration of models for a cargo assembly planning problem*. arXiv, 2015. Disponível em: <<https://arxiv.org/abs/1504.00445>>. Citado na página 26.
- BEMPORAD, A.; MORARI, M. Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints. *Automatica*, Elsevier BV, v. 35, n. 3, p. 407–427, mar. 1999. Citado 2 vezes nas páginas 44 e 45.
- BERTAZZI, L.; MAGGIONI, F. A stochastic multi-stage fixed charge transportation problem: Worst-case analysis of the rolling horizon approach. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 267, n. 2, p. 555–569, jun. 2018. Citado na página 51.
- BERTSIMAS, D. et al. A comparison of monte carlo tree search and rolling horizon optimization for large-scale dynamic resource allocation problems. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 263, n. 2, p. 664–678, dez. 2017. Citado na página 51.
- BOLAND, N.; GULCZYNSKI, D.; SAVELSBERGH, M. A stockyard planning problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Elsevier BV, v. 1, n. 3, p. 197–236, set. 2012. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.

- BOLAND, N. et al. Improved stockyard management strategies for coal export terminal at newcastle. In: SPRINGER. *Proceedings of the 19th International Congress on Modelling and Simulation, Perth, W.A.* [S.l.], 2011. p. 718–724. Citado na página 26.
- BOLAND, N.; SAVELSBERGH, M.; WATERER, H. Shipping data generation for the hunter valley coal chain. *Optimization Online e-Print ID*, p. 02–3755, 2013. Citado na página 27.
- BREDSTRÖM, D.; FLISBERG, P.; RÖNNQVIST, M. A new method for robustness in rolling horizon planning. *International Journal of Production Economics*, Elsevier BV, v. 143, n. 1, p. 41–52, maio 2013. Citado na página 51.
- CARLSSON, J. G.; SHI, J. A linear relaxation algorithm for solving the sum-of-linear-ratios problem with lower dimension. *Operations Research Letters*, Elsevier, v. 41, n. 4, p. 381–389, 2013. Citado na página 48.
- CHEON, S.; DOWALL, D. E.; SONG, D.-W. Evaluating impacts of institutional reforms on port efficiency changes: Ownership, corporate structure, and total factor productivity changes of world container ports. *Transportation research part E: Logistics and transportation review*, Elsevier, v. 46, n. 4, p. 546–561, 2010. Citado na página 27.
- CLARK, X.; DOLLAR, D.; MICCO, A. Port efficiency, maritime transport costs, and bilateral trade. *Journal of development economics*, Elsevier, v. 75, n. 2, p. 417–450, 2004. Citado na página 27.
- CORLU, C. G. et al. Optimizing energy consumption in transportation: Literature review, insights, and research opportunities. *Energies*, MDPI AG, v. 13, n. 5, p. 1115, mar. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en13051115>>. Citado na página 24.
- CSALÓDI, R. et al. Industry 4.0-driven development of optimization algorithms: A systematic overview. *Complexity*, 2021. Citado na página 53.
- DAFNOMILIS, I. et al. Optimal equipment deployment for biomass terminal operations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier BV, v. 115, p. 147–163, jul. 2018. Citado na página 27.
- DEVINE, M. T.; BERTSCH, V. Examining the benefits of load shedding strategies using a rolling-horizon stochastic mixed complementarity equilibrium model. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 267, n. 2, p. 643–658, jun. 2018. Citado na página 51.
- DING, T. et al. Interval power flow analysis using linear relaxation and optimality-based bounds tightening (obbt) methods. *IEEE Transactions on Power Systems*, IEEE, v. 30, n. 1, p. 177–188, 2014. Citado na página 48.
- DING, T. et al. A bi-objective dc-optimal power flow model using linear relaxation-based second order cone programming and its pareto frontier. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 88, p. 13–20, 2017. Citado na página 48.
- ERGUN, H. et al. Optimal power flow for ac–dc grids: Formulation, convex relaxation, linear approximation, and implementation. *IEEE transactions on power systems*, IEEE, v. 34, n. 4, p. 2980–2990, 2019. Citado na página 48.

- FAHEEM, M. et al. Smart grid communication and information technologies in the perspective of industry 4.0: Opportunities and challenges. *Computer Science Review*, Elsevier, v. 30, p. 1–30, 2018. Citado na página 53.
- FATTAHI, M. et al. Dynamic supply chain network design with capacity planning and multi-period pricing. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 81, p. 169–202, 2015. Citado na página 48.
- GIMELLI, A. et al. Optimal configuration of modular cogeneration plants integrated by a battery energy storage system providing peak shaving service. *Applied Energy*, Elsevier BV, v. 242, p. 974–993, maio 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.03.084>>. Citado na página 25.
- GOUNARIS, C. E.; MISENER, R.; FLOUDAS, C. A. Computational comparison of piecewise- linear relaxations for pooling problems. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, ACS Publications, v. 48, n. 12, p. 5742–5766, 2009. Citado na página 48.
- GUIGUES, V.; SAGASTIZÁBAL, C. The value of rolling-horizon policies for risk-averse hydro-thermal planning. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 217, n. 1, p. 129–140, fev. 2012. Citado na página 51.
- HANOUN, S. et al. An effective heuristic for stockyard planning and machinery scheduling at a coal handling facility. In: *2013 11th IEEE International Conference on Industrial Informatics (INDIN)*. [S.l.]: IEEE, 2013. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- HARALDSSON, J.; JOHANSSON, M. Energy efficiency in the supply chains of the aluminium industry: The cases of five products made in sweden. *Energies*, MDPI AG, v. 12, n. 2, p. 245, jan. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en12020245>>. Citado na página 24.
- HOSSAIN, M. A. et al. Evolution of microgrids with converter-interfaced generations: Challenges and opportunities. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, Elsevier, v. 109, p. 160–186, 2019. Citado na página 53.
- HU, D.; YAO, Z. Stacker-reclaimer scheduling in a dry bulk terminal. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Informa UK Limited, v. 25, n. 11, p. 1047–1058, nov. 2012. Citado na página 27.
- IBM. Cplex 12.6 reference manual. *IBM ILOG*, v. 12, 2013. Citado 6 vezes nas páginas 56, 60, 73, 75, 81 e 88.
- IRIS, Ç.; LAM, J. S. L. A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Elsevier BV, v. 112, p. 170–182, set. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.069>>. Citado na página 25.
- KALINOWSKI, T.; KAPOOR, R.; SAVELSBERGH, M. W. P. Scheduling reclaimers serving a stock pad at a coal terminal. *Journal of Scheduling*, Springer Science and Business Media LLC, v. 20, n. 1, p. 85–101, set. 2016. Citado na página 27.
- KARIMI, S.; KWON, S. Comparative analysis of the impact of energy-aware scheduling, renewable energy generation, and battery energy storage on production scheduling. *International Journal of Energy Research*, Wiley, v. 45, n. 13, p. 18981–18998, jul. 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/er.6999>>. Citado na página 24.

KHALAF, A. F.; WANG, Y. Energy-cost-aware flow shop scheduling considering intermittent renewables, energy storage, and real-time electricity pricing. *International Journal of Energy Research*, Wiley, v. 42, n. 12, p. 3928–3942, jun. 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1002/er.4130>>. Citado na página 24.

KOCH, B.; MEHENDIRATTA, V. Solving the stockyard optimization trilemma. *Mining Magazine*, p. Available at <https://www.miningmagazine.com/tag/stockyard>, 2016. Citado na página 25.

KOPANOS, G. M.; PISTIKOPOULOS, E. N. Reactive scheduling by a multiparametric programming rolling horizon framework: A case of a network of combined heat and power units. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, American Chemical Society (ACS), v. 53, n. 11, p. 4366–4386, mar. 2014. Citado na página 51.

LE, V. T. et al. Complex simulation of stockyard mining operations. In: *Springer Proceedings in Mathematics & Statistics*. [S.l.]: Springer International Publishing, 2014. p. 529–537. Citado na página 26.

LI, Z.; IERAPETRITOU, M. G. Rolling horizon based planning and scheduling integration with production capacity consideration. *Chemical Engineering Science*, Elsevier BV, v. 65, n. 22, p. 5887–5900, nov. 2010. Citado na página 51.

LU, T.-F. Modeling for stockpile operation associated with bulk solid materials using bucket wheel reclaimer. *International Journal of Information Acquisition*, World Scientific Pub Co Pte Lt, v. 07, n. 04, p. 357–373, dez. 2010. Citado na página 27.

MENEZES, G. C.; MATEUS, G. R.; RAVETTI, M. G. A branch and price algorithm to solve the integrated production planning and scheduling in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 258, n. 3, p. 926–937, maio 2017. Citado 5 vezes nas páginas 26, 27, 37, 56 e 73.

MOON, J.-Y.; SHIN, K.; PARK, J. Optimization of production scheduling with time-dependent and machine-dependent electricity cost for industrial energy efficiency. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer Science and Business Media LLC, v. 68, n. 1-4, p. 523–535, mar. 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s00170-013-4749-8>>. Citado 2 vezes nas páginas 24 e 25.

MUNIR, M. et al. Supply chain risk management and operational performance: The enabling role of supply chain integration. *International Journal of Production Economics*, Elsevier BV, v. 227, p. 107667, set. 2020. Citado na página 28.

NIELSEN, L. K.; KROON, L.; MARÓTI, G. A rolling horizon approach for disruption management of railway rolling stock. *European Journal of Operational Research*, Elsevier BV, v. 220, n. 2, p. 496–509, jul. 2012. Citado na página 51.

NOTA, G. et al. Energy efficiency in industry 4.0: The case of batch production processes. *Sustainability*, MDPI AG, v. 12, n. 16, p. 6631, ago. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/su12166631>>. Citado na página 24.

OLIVEIRA JUNIOR, V. B. de; PENA, J. G. C.; SALLES, J. L. F. An improved plant-wide multiperiod optimization model of a byproduct gas supply system in the iron and steel-making process. *Applied Energy*, Elsevier BV, v. 164, p. 462–474, fev. 2016. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.11.043>>. Citado na página 24.

- PENA, J. G. C.; OLIVEIRA JUNIOR, V. B. de; SALLES, J. L. F. Optimal scheduling of a by-product gas supply system in the iron-and steel-making process under uncertainties. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier, v. 125, p. 351–364, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 51.
- PYTHON SOFTWARE FOUNDATION. *Python language reference*. [S.l.]: Python Software Foundation Wilmington, DE, USA, 2015. Citado 3 vezes nas páginas 56, 75 e 87.
- RANA, Z. A.; KHOR, C. S.; ZABIRI, H. Computational experience with piecewise linear relaxations for petroleum refinery planning. *Processes*, MDPI, v. 9, n. 9, p. 1624, 2021. Citado na página 48.
- ROCHA, H. R. et al. An artificial intelligence based scheduling algorithm for demand-side energy management in smart homes. *Applied Energy*, Elsevier BV, v. 282, p. 116145, jan. 2021. Citado na página 24.
- RODRIGUES, M. et al. Reactive scheduling approach for multipurpose chemical batch plants. *Computers & Chemical Engineering*, Elsevier BV, v. 20, p. S1215–S1220, jan. 1996. Citado na página 51.
- ROSALES, A. et al. *Electricity shortages and climate change in Brazil*. 2021. Disponível em: <<https://ihsmarkit.com/research-analysis/electricity-shortages-and-climate-change-in-brazil.html>>. Citado na página 24.
- SAVELSBERGH, M.; KAPOOR, R. Optimizing reclaimer schedules. In: *Proceedings of the 22nd National Conference of the Australian Society for Operations Research, Adelaide, Australia*. [S.l.: s.n.], 2013. p. 1–6. Citado na página 27.
- SAVELSBERGH, M.; SMITH, O. Cargo assembly planning. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, Elsevier BV, v. 4, n. 3, p. 321–354, set. 2015. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 27.
- SAVELSBERGH, M.; SMITH, O. Linear models for stockpiling in open-pit mine production scheduling problems. *Eur. J. Oper. Res.*, v. 260, p. 212–221. Available at <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221716310335>., 2015. Citado na página 26.
- SERVARE JUNIOR, M. W. J.; ROCHA, H. R. de O.; SALLES, J. L. F. A multi-product mathematical model for iron ore stockyard planning problem. *Brazilian Journal of Development*, Brazilian Journal of Development, v. 6, n. 7, p. 45076–45089, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 26, 27 e 56.
- SERVARE JUNIOR, M. W. J. et al. A linear relaxation-based heuristic for iron ore stockyard energy planning. *Energies*, MDPI AG, v. 13, n. 19, p. 5232, out. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/en13195232>>. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 40.
- SHAHZAD, K. et al. Adaptive multi-input medium access control (ami-mac) design using physical layer cognition for tactical sdr networks. *IEEE Access*, IEEE, v. 9, p. 58364–58377, 2021. Citado na página 48.

- SHARIF, A. M.; IRANI, Z. Supply chain leadership. *International Journal of Production Economics*, Elsevier, v. 140, n. 1, p. 57–68, 2012. Citado na página 28.
- SILVENTE, J. et al. A rolling horizon optimization framework for the simultaneous energy supply and demand planning in microgrids. *Applied Energy*, Elsevier BV, v. 155, p. 485–501, out. 2015. Citado na página 51.
- TANG, L.; SUN, D.; LIU, J. Integrated storage space allocation and ship scheduling problem in bulk cargo terminals. *IIE Transactions*, Taylor & Francis, v. 48, n. 5, p. 428–439, 2016. Citado na página 27.
- TANG, X.; JIN, J. G.; SHI, X. Stockyard storage space allocation in large iron ore terminals. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier BV, v. 164, p. 107911, fev. 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2021.107911>>. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 28.
- TAYLOR, J. A.; HOVER, F. S. Linear relaxations for transmission system planning. *IEEE Transactions on power systems*, IEEE, v. 26, n. 4, p. 2533–2538, 2011. Citado na página 48.
- THANH, P. N.; PÉTON, O.; BOSTEL, N. A linear relaxation-based heuristic approach for logistics network design. *Computers & Industrial Engineering*, Elsevier BV, v. 59, n. 4, p. 964–975, nov. 2010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.09.007>>. Citado 3 vezes nas páginas 48, 49 e 71.
- TIACCI, L.; SAETTA, S. Demand forecasting, lot sizing and scheduling on a rolling horizon basis. *International Journal of Production Economics*, Elsevier BV, v. 140, n. 2, p. 803–814, dez. 2012. Citado na página 51.
- TSAO, Y.-C. Distribution center network design under trade credits. *Applied Mathematics and Computation*, Elsevier BV, v. 222, p. 356–364, out. 2013. Citado na página 28.
- UMETANI, S.; FUKUSHIMA, Y.; MORITA, H. A linear programming based heuristic algorithm for charge and discharge scheduling of electric vehicles in a building energy management system. *Omega*, Elsevier, v. 67, p. 115–122, 2017. Citado na página 48.
- UNSAI, O.; OGUZ, C. An exact algorithm for integrated planning of operations in dry bulk terminals. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, Elsevier, v. 126, p. 103–121, 2019. Citado na página 27.
- VIANEN, T. A. van et al. Simulation-based operational control of a dry bulk terminal. In: *Proceedings of 2012 9th IEEE International Conference on Networking, Sensing and Control*. [S.l.]: IEEE, 2012. Citado na página 27.
- VIANEN, T. V.; OTTJES, J.; LODEWIJKS, G. Belt conveyor network design using simulation. *Journal Simulation*, v. 260, p. 157–165. doi:10.1057/jos.2014.38, 2016. Citado na página 26.
- VIANEN, T. van; OTTJES, J.; LODEWIJKS, G. Simulation-based determination of the required stockyard size for dry bulk terminals. *Simulation Modelling Practice and Theory*, Elsevier BV, v. 42, p. 119–128, mar. 2014. Citado na página 27.

VIANEN, T. van; OTTJES, J.; LODEWIJKS, G. Simulation-based rescheduling of the stacker–reclaimer operation. *Journal of Computational Science*, Elsevier BV, v. 10, p. 149–154, set. 2015. Citado na página 27.

WIKIPEDIA. Energy manegement. *Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/Energy_management>*. Acesso em: 22 de dezembro, 2022. Citado na página 24.

XIAO-PING, B.; YU-HONG, Z.; YA-NAN, L. A novel approach to study real-time dynamic optimization analysis and simulation of complex mine logistics transportation hybrid system with belt and surge links. *Discrete Dynamical In Nature and Society*, v. 260, p. 1–8. doi:10.1155/2015/601578, 2015. Citado na página 26.

ZAMARRIPA, M. et al. Rolling horizon approach for production–distribution coordination of industrial gases supply chains. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, American Chemical Society (ACS), v. 55, n. 9, p. 2646–2660, fev. 2016. Citado na página 51.

ZHANG, W.; NIU, C. A linear relaxation model for shape optimization of constrained contact force problem. *Computers & Structures*, Elsevier, v. 200, p. 53–67, 2018. Citado na página 48.