

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

MARIA FERNANDA RAMOS MÁRQUEZ

**GERAÇÃO DE UM PROGRAMA DE ROTAÇÃO DE POSTOS DE TRABALHO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS ERGONÔMICOS E DE PRODUTIVIDADE**

Sorocaba
2015

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EM GESTÃO E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO - PPGEPS

MARIA FERNANDA RAMOS MÁRQUEZ

**GERAÇÃO DE UM PROGRAMA DE ROTAÇÃO DE POSTOS DE TRABALHO
CONSIDERANDO CRITÉRIOS ERGONÔMICOS E DE PRODUTIVIDADE**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de São Carlos - *Campus Sorocaba*, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia de Produção.

Orientação: Prof. Dr. João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Financiamento: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES.

Sorocaba
2015

Ramos Márquez, Maria Fernanda

Geração de um programa de rotação de postos de trabalho considerando critérios ergonômicos e de produtividade / Maria Fernanda Ramos Márquez. -- 2015.

118 f. : 30 cm.

Dissertação (mestrado)-Universidade Federal de São Carlos, campus Sorocaba, Sorocaba

Orientador: João Eduardo Azevedo Ramos da Silva

Banca examinadora: Eli Vitor Toso, Roberto Funes Abrahão

Bibliografia

1. Rotação de postos de trabalho. 2. Ergonomia. 3. Produtividade. I. Orientador. II. Sorocaba-Universidade Federal de São Carlos. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada pelo Programa de Geração Automática da Biblioteca campus Sorocaba (B-So).

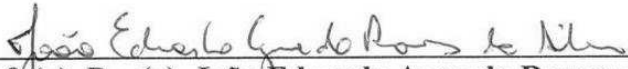
DADOS FORNECIDOS PELO(A) AUTOR(A)

MARIA FERNANDA RAMOS MARQUEZ

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção do Centro de Ciências em Gestão e Tecnologia da Universidade Federal de São Carlos para obtenção do título de mestre em Engenharia de Produção, Área de Concentração: Gestão de Operações.

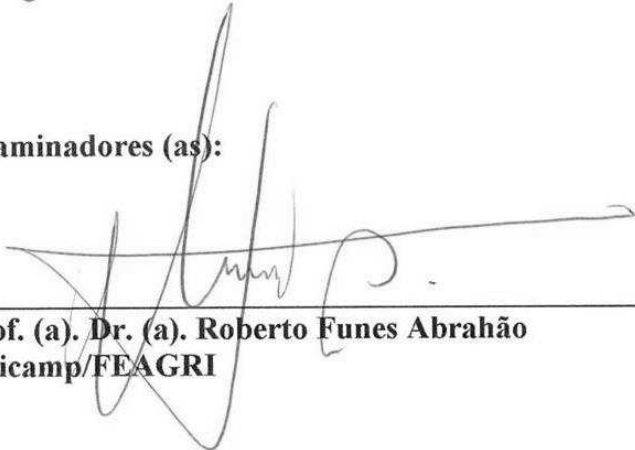
Sorocaba, 24 de agosto de 2015

Orientador (a):

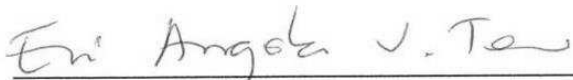


Prof. (a). Dr. (a). João Eduardo Azevedo Ramos da Silva
UFSCar/DEPS

Examinadores (as):



Prof. (a). Dr. (a). Roberto Funes Abrahão
Unicamp/FEAGRI



Prof. (a). Dr. (a). Eli Angela Vitor Toso
UFSCar/DEPS

*Esta conquista, ao igual que meus próximos passos, vão dedicados a duas pessoas que partiram sem chance de dizer adeus: Rosa Maria Nerio e Candor Flórez. Espero vê-las de novo na eternidade. Meu amor por vocês **sempre** manterá vivas suas memórias em mim.*

AGRADECIMENTOS

Inicialmente, quero agradecer ao único Deus verdadeiro, que por sua misericórdia me deu sabedoria, força, paciência e persistência para poder completar este projeto.

A Ele também agradeço por me dar a chance de amar e ser amada por meus pais, Maria Paulina e Fernando, que com seu exemplo, apoio e compreensão me motivaram a dar sempre o melhor de mim.

Ao meu orientador, o Professor João Eduardo, por seu compromisso, dedicação e paciência. Mas do que um orientador foi meu pai na vida acadêmica. Minha gratidão será para a vida toda.

Aos professores José Geraldo, Rosane, Eli e Maria Luiza, que sempre tiveram um sorriso no rosto, palavras acolhedoras, conselhos de vida e de profissão. Obrigada por ser excepcionais.

Ao Diego. Simplesmente não há espaço suficiente nesta folha para descrever tudo pelo que eu te agradeço. É uma bênção te ter como companheiro de vida.

Aos meus amigos, por serem um pilar na minha vida. Alfredo, Karim, Aura, Maritha, Nadya, Rê, Brena, Pedro, Alê e Carlos, obrigada pela incondicionalidade.

À CAPES, pelo financiamento da minha pesquisa.

À Érica, por ser o motor do PPGEP-S. A todo o corpo docente do programa, obrigada pela amabilidade e a disposição.

RESUMO

As tensões laborais que demandam esforços e repetição de atividades ou posturas por períodos prolongados têm sobrecarregado os sistemas físicos humanos, pois estes esforços são inerentemente pouco naturais. A rotação de postos de trabalho ajuda na prevenção de traumas ocasionados por esses fatores através da diversificação de tarefas e da redução dos períodos de exposição a elementos que possam perturbar os trabalhadores física ou cognitivamente. Múltiplas ferramentas têm sido utilizadas para o planejamento das rotações, dentro dos quais é possível encontrar a modelagem matemática e simulação. Desta forma, este trabalho tem o objetivo de propor um modelo matemático de programação linear inteira mista para a geração de programas de rotação de postos de trabalho que permitam minimizar o risco de desenvolver Lesões por Esforços Repetitivos/Doenças Osteoarticulares Relacionadas ao Trabalho (LER/DORT) causados pela repetitividade em uma linha de embalagem de produtos. A produtividade dos trabalhadores em cada posto de trabalho também é levada em conta. Para testar a robustez dos resultados sob condições estocásticas, foi desenvolvido uma simulação computacional onde são consideradas paradas de diversas origens no sistema, assim como variações na taxa de produtividade dos trabalhadores. A principal contribuição do estudo é a análise ergonômica e de produtividade da rotação de postos de trabalho através da integração das duas técnicas. O esforço relacionado com tarefas repetitivas foi medido pelo indicador *Occupational Repetitive Actions Index* (OCRA). A produtividade foi avaliada através da medição do número de unidades processadas por cada trabalhador em cada posto de trabalho. Para avaliar a aderência da metodologia à realidade e a qualidade de suas respostas, um estudo de caso foi conduzido em uma linha de embalagem manual de produtos, caracterizada pela repetitividade de tarefas. A partir dos dados fornecidos pela empresa, testes computacionais foram realizados para encontrar o melhor *trade-off* entre a minimização da exposição a riscos ergonômicos e a manutenção da produtividade. As formulações propostas provaram ser uma representação ajustada do sistema estudado, quanto aos riscos ergonômicos e de produtividade, gerando soluções práticas e realistas, plausíveis de implementação.

PALAVRAS CHAVE. Rotação de postos de trabalho, programação matemática, simulação, LER/DORT, produtividade.

RESUMEN

Las tensiones laborales que demandan esfuerzos y repetición de actividades o posturas por periodos prolongados han sobrecargado los sistemas físicos humanos, pues estos esfuerzos son inherentemente poco naturales. La rotación de puestos de trabajo ayuda a la prevención de traumas ocasionados por estos factores, a través de la diversificación de tareas y la reducción de los períodos de exposición a elementos que podrían perjudicar a los trabajadores física o cognitivamente. Múltiples herramientas se han utilizado para la planificación de rotaciones, dentro de las cuales es posible encontrar el modelaje matemático y la simulación. Así, este trabajo tiene como objetivo proponer un modelo matemático de programación lineal entera mixta para generar programas de rotación puestos de trabajo que permitan minimizar el riesgo de desarrollar trastornos musculoesqueléticos (TME) causados por la repetición en una línea de embalaje de productos. La productividad de los trabajadores en cada estación de trabajo también es considerada. Para poner a prueba la solidez de los resultados en condiciones estocásticas, fue desarrollada una simulación computacional que tiene en cuenta paradas en el sistema de diversos orígenes, al igual que variaciones en la tasa de productividad de los trabajadores. La principal contribución de este estudio es el análisis ergonómico y productivo de la rotación de puestos de trabajo mediante la combinación de dos técnicas. El esfuerzo asociado a las tareas repetitivas se midió por utilizando el indicador *Occupational Repetitive Actions Index* (OCRA). La productividad se evaluó midiendo el número de unidades procesadas por trabajador en cada puesto de trabajo. Para evaluar la adherencia de la metodología a la realidad y la calidad de sus respuestas, un estudio de caso se realizó en una línea de embalaje manual de productos, que se caracteriza por la repetición de tareas. A partir de los datos facilitados por la empresa, se realizaron pruebas para determinar el mejor punto de equilibrio entre la minimización de la exposición a los riesgos ergonómicos y el mantenimiento de la productividad. Las formulaciones propuestas resultaron ser una representación ajustada del sistema estudiado, en cuanto a los riesgos ergonómicos y a la productividad, generando soluciones prácticas, realistas y plausibles.

PALABRAS CLAVE. Rotación de puestos de trabajo, programación matemática, simulación, trastornos musculoesqueléticos (TME), productividad.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1. Representação do layout das linhas estudadas.....	43
Figura 5.1. Descrição do problema de programação de horários e sequenciamento.....	67
Figura 5.2. Simulação computacional do caso estudado.	75
Figura 5.3. Cálculo do número de replicações.	76
Figura 5.4. Integração do modelo matemático e simulação computacional.	78
Figura 6.1. Caracterização de testes realizados.	83
Figura 6.2. Variação do valor do índice OCRA ao longo da semana, primeira iteração.	85
Figura 6.3. Variação do valor do índice OCRA ao longo da semana, segunda iteração.	89
Figura 6.4. Variação do índice OCRA acumulado de cada trabalhador através das iterações.	92
Figura 6.5. Aumento do valor do índice OCRA ao longo da semana, eliminação de restrições de produtividade.	95
Figura 6.6. Variação do índice OCRA na semana, eliminação de restrições ergonômicas.....	98
Figura 6.7. Índice OCRA vs. Produtividade nos cenários.....	100

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1.1. Quantidade e valor de aposentadorias urbanas por invalidez ativas, relacionadas a doenças do sistema osteomuscular e do tecido conjuntivo.....	19
Tabela 2.1.2. Fatores de risco de desenvolvimento de LER/DORT por região corporal	22
Tabela 2.1.3. Doenças relacionadas ao trabalho e fatores de risco	25
Tabela 2.1.4. Estágios dos LER/DORT de acordo com manifestações clínicas	28
Tabela 2.2.1. Elementos para determinar o fator força..	35
Tabela 2.2.2. Elementos para determinar o fator multiplicador postural	35
Tabela 2.2.3. Elementos multiplicadores dos fatores adicionais.....	36
Tabela 2.2.4. Elementos multiplicadores do fator recuperação.....	36
Tabela 2.2.5. Critérios para determinar os níveis de esforço por grupo muscular	37
Tabela 2.2.6. Prioridade de ação de acordo às combinações de nível, duração e frequência de esforço.	39
Tabela 3.1.1. Unidades embaladas mensalmente em cada linha durante o ano de 2014	45
Tabela 3.1.2. Distribuição de probabilidade da produtividade dos trabalhadores que rotacionam nas linhas estudadas.	46
Tabela 4.1.1. Principais pesquisas de rotação de postos de trabalho a partir de abordagens matemáticas.	64
Tabela 6.1.1. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, primeira iteração.	84
Tabela 6.1.2. Unidades produzidas por linha via otimização, primeira iteração.	85
Tabela 6.1.3. Paradas diárias em cada posto de trabalho, primeira replicação da simulação.	86
Tabela 6.1.4. Resultados de produtividade obtidos via simulação, primeira iteração.	87
Tabela 6.1.5. Parâmetros ajustados de produtividade para a re-otimização.....	87
Tabela 6.1.6. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, segunda iteração.	88
Tabela 6.1.7. Unidades produzidas por linha via otimização, segunda iteração.	89
Tabela 6.1.8. Resultados de produtividade obtidos via simulação, segunda iteração.	90
Tabela 6.1.9. Parâmetros ajustados de produtividade para a re-otimização.....	91
Tabela 6.1.10. Resultados das iterações estudadas via otimização.	93
Tabela 6.1.11. Resultados das iterações estudadas via simulação.	94

Tabela 6.2.1. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, eliminação de restrições de produtividade.	96
Tabela 6.2.2. Resultados de produtividade obtidos via simulação, eliminação de restrições de produtividade.	96
Tabela 6.3.1. Programa de rotação ao eliminar restrições de caráter ergonômico.	97
Tabela 6.3.2. Resultados de produtividade obtidos via simulação, eliminação de restrições de caráter ergonômico.	98
Tabela 6.4.1. Resultados de produtividade e do índice OCRA nos cenários estudados.	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1. Objetivo	15
1.2. Metodologia.....	16
1.3. Escopo e limitações	17
2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	18
2.1. LER/DORT de origem laboral.....	18
2.2. LER/DORT e produtividade em ambientes industriais	28
2.2.1. Métodos de estimação de risco ergonômico.....	30
2.2.2. Métodos de incorporação de produtividade.....	39
3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA.....	42
3.1. Produtividade no sistema	45
3.2. Paradas no sistema	47
3.3. Organização de trabalho	48
4. REVISÃO DA LITERATURA.....	49
4.1. Rotação analisada através de procedimentos matemáticos.....	53
5. ABORDAGEM PROPOSTA.....	66
5.1. Modelagem matemática	66
5.2. Simulação computacional	74
5.2.1. Simulação computacional do problema estudado	75
5.3. Integração dos métodos de otimização e simulação	78
6. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA	81
6.1. Resultados do primeiro teste: iterações	84
6.2. Resultados do segundo teste: eliminação de restrições de produtividade.....	95

6.3. Resultados do segundo teste: eliminação de critérios ergonômicos	97
6.4. Comparação entre soluções.....	99
7. CONCLUSÕES.....	102
8. REFERÊNCIAS.....	105
GLOSSÁRIO.....	116

1. INTRODUÇÃO

A prevenção de acidentes de trabalho é uma prioridade para empresas de todos os setores produtivos, já que um trabalhador afastado pode causar grandes custos, sem levar em consideração os danos intangíveis, tais como prejuízo à imagem da empresa, desmotivação e insatisfação de outros trabalhadores e baixa produtividade.

De acordo com o boletim sobre concessão de benefícios emitido pelo Ministério de Previdência Social, para o ano de 2014 as principais doenças relacionadas ao trabalho foram os Lesões por Esforços Repetitivos/Doenças Osteoarticulares Relacionadas ao Trabalho (LER/DORT), sendo a primeira causa de afastamentos no país. Por tal motivo, empresas desenvolvem alternativas de redesenho dos postos de trabalho para prevenir LER/DORT, dentro das quais está a implementação de programas de rotação de postos de trabalho (TAYYARI; SMITH, 1997). Esta modalidade de organização do trabalho tenta reduzir a exposição a riscos laborais por meio do incremento da variedade das tarefas realizadas (HAIMS; CARAYON, 2002).

Além dos benefícios para a saúde, a rotação de postos de trabalho também pode ser utilizada para melhorar a produtividade dos trabalhadores, incrementar sua polivalência, diminuir o tédio e/ou monotonia e fomentar a aprendizagem, entre outras estratégias (ASENSIO-CUESTA et al., 2012a).

Por outro lado, a eficácia das rotações reside em sua correta aplicação. Um programa onde, por exemplo, o balanceamento das cargas biomecânicas é inadequado, pode trazer consequências desastrosas tanto para a saúde do trabalhador como para a produtividade da empresa que o aplica. Isto também acontecerá se o tempo de permanência de um trabalhador em um posto de trabalho é excessivo (DAVIS; JORGENSEN, 2005). Já em ambientes caracterizados por repetição de tarefas simples com ciclo de trabalhos curtos, as rotações que visam diminuir a exposição a riscos envolvidos nos postos de trabalho podem ser contraproducentes no curto prazo a partir do marco da produtividade. Ao tentar balancear a exposição a riscos desconsiderando a aptidão dos trabalhadores, é possível que lhes sejam designadas tarefas onde tenham um desempenho menor. Assim, uma boa estratégia consistiria em rotacionar trabalhadores entre os postos de trabalho onde têm o melhor desempenho.

A aplicação de um programa de rotação pode trazer dificuldades relacionadas à resistência de trabalhadores antigos à mudança, à educação e formação de pessoal para os novos postos de trabalho e aos custos diretos de implementação, e exposição de pessoal não treinado a situações de risco em ambientes industriais (MALINSKI, 2002). Por estes motivos, é importante realizar a execução do programa gradualmente, para poder identificar e solucionar problemas visando sua implantação definitiva (ERIKSSON; ORTEGA, 2006).

É possível encontrar estudos sobre os benefícios das rotações de postos de trabalho baseados em múltiplas abordagens, que incluem a aplicação de questionários, entrevistas, acompanhamento do estado de saúde dos envolvidos, até o desenvolvimento de simulação de sistemas reais que, usualmente, propõem modelos generalizáveis (BAINES et al., 2004), dentro dos quais está a modelagem matemática e a simulação. Na modelagem matemática, tenta-se minimizar ou maximizar uma função objetivo, a qual é representada por indicadores quantitativos que avaliam os níveis de criticidade dos critérios selecionados para a geração das rotações. Entretanto, são as poucas pesquisas que consideram conjuntamente as demandas físicas do trabalho e os tempos de execução das atividades em problemas de alocação de tarefas, como os problemas de rotação de postos de trabalho. De fato, tradicionalmente os processos de avaliação do risco ergonômico e designação de tarefas são realizados de forma independente, sendo que é necessário integrar aspectos ergonômicos e de produtividade cada indivíduo na hora de desenvolver ferramentas de gestão orientadas ao apoio de decisões de alocação de recursos (BOENZI et al., 2015).

Assim, a presente pesquisa propõe uma metodologia que permite ao planejador gerar e avaliar programas de rotação que cheguem a um bom *trade-off* entre a minimização da exposição a fatores de risco associados aos postos de trabalho e a manutenção da produtividade em ambientes caracterizados pela repetitividade das tarefas. Uma abordagem estocástica via simulação ajuda a determinar a viabilidade dos resultados em condições mais realistas.

1.1. Objetivo

O objetivo principal desta pesquisa é a proposição e combinação de ferramentas (modelagem matemática e simulação computacional) para gerar e avaliar programas de rotação de postos de trabalho. Indicadores de tendência quantitativos correlacionados a riscos ergonômicos são

incluídos na modelagem matemática, tanto na função objetivo como em restrições, a fim de minimizar os constrangimentos na saúde dos trabalhadores, enquanto são garantidos os níveis desejados de produtividade. Os programas de rotação são criados através da resolução de modelos de otimização, capazes de reduzir a ocorrência de LER/DORT por meio da alocação adequada de trabalhadores a postos de trabalho durante diferentes intervalos de tempo (intervalos de rotação) ao longo da jornada laboral. O desempenho dos trabalhadores em cada posto de trabalho também é levado em consideração. Já via simulação, os programas são analisados para determinar se chegaram a um bom *trade-off* entre produtividade e diminuição de exposição a riscos associados ao trabalho. Nas simulações são levadas em consideração as paradas no sistema de diversas origens e a variação na taxa de produtividade dos trabalhadores.

1.2. Metodologia

A presente pesquisa pode ser classificada como uma pesquisa empírica prescritiva segundo Bertrand e Fransoo (2002), pois simula um sistema real através de modelagem e se preocupa em explicar seu comportamento. Além disso, fornece um suporte aos processos de tomada de decisão, visando melhorar a situação atual.

O primeiro passo consiste na realização de uma análise sobre o problema de rotação de postos de trabalho a partir das perspectivas ergonômicas e de produtividade em ambientes caracterizados pela repetitividade de tarefas manuais. Métodos de identificação e avaliação de riscos físicos associados ao trabalho, em conjunto com técnicas de medição de produtividade foram examinados. Seguidamente, é feita a proposição de um modelo matemático genérico, adaptável a sistemas com altas repetições, que incorpora indicadores de avaliação de exposição a riscos ergonômicos e indicadores de produtividade em ambientes repetitivos. Logo após, o modelo é testado e validado utilizando dados e informações fornecidos por uma empresa do setor automotivo. Ajustes menores foram feitos na modelagem para adaptá-la a pequenas especificações da empresa. A seguir, o programa gerado pelo modelo é avaliado via simulação computacional, dando cobertura a particularidades desconsideradas na modelagem e que podem incidir na qualidade da solução. Se os resultados obtidos nas condições mais realistas da simulação não cumprem com as metas de produtividade, então são efetuados ajustes nos

parâmetros da modelagem para gerar um novo programa de rotação que será avaliado novamente via simulação. Este processo é reiterado até chegar no programa com o melhor *trade-off*.

1.3. Escopo e limitações

A presente pesquisa trata a nível operacional um problema derivado da alocação de trabalhadores a postos de trabalho e/ou tarefas, de forma a estabelecer uma rotina que garanta o desempenho organizacional sem colocar em prejuízo a saúde física dos trabalhadores, levando em consideração sua heterogeneidade. Existem diversas limitações para esta pesquisa, dentro das quais está a exclusão de fatores de risco físicos que não estão diretamente relacionados com os LER/DORT (ruído, iluminação, temperaturas). Componentes mentais e psicossociais como satisfação, estresse, carga de trabalho percebida, entre outros também foram omitidos. Os métodos de avaliação ergonômica utilizados, também conhecidos como *check-lists*, representam a sua vez uma limitação ao serem métodos “superficiais” para estimação de riscos envolvidos no trabalho. As possíveis perdas de produtividade no momento de efetuar a troca de um posto de trabalho a outro também são desconsideradas, pois se assume que os postos estão localizados um próximo do outro. Adicionalmente, somente uma instância é avaliada, sendo necessário testar a viabilidade da presente proposta com instâncias maiores.

Ressalta-se que a presente proposta não constitui uma substituição à análise macroergonômica do trabalho, envolvendo a interação de pessoas com tecnologia que fazem parte de um sistema organizacional com um ambiente interno que está em relacionamento com o ambiente externo (KLEINER, 2006). Trata-se de uma estratégia para dar uma solução temporária aos problemas relacionados ao projeto inadequado de postos de trabalho e tarefas que expõem trabalhadores a riscos.

2. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Nesta seção são apresentadas informações relacionadas ao problema estudado. De forma específica, é feita uma contextualização sobre LER/DORT e produtividade no ambiente de trabalho. Também é realizada uma descrição do sistema estudado, e são apresentados os métodos de avaliação de riscos físicos e de produtividade.

2.1. LER/DORT de origem laboral

Segundo Maeno et al., (2001), as lesões por esforços repetitivos e LER/DORT de origem laboral “são todos aqueles distúrbios ou doenças do sistema osteomuscular, que podem afetar as costas, o pescoço, ombros e extremidades superiores e que estão relacionadas ao trabalho”.

No Brasil, estes transtornos constituem a primeira causa de afastamento laboral no país (MINISTÉRIO DE PREVIDÊNCIA SOCIAL, 2014), e sua repercussão na qualidade de vida dos trabalhadores é inegável, refletindo-se na diminuição de sua remuneração, gastos em medicamentos, terapias, consultas médicas e em até dificuldades sociais e pessoais.

Especificamente no estado de São Paulo, no período de 2009 a 2013 foram notificados 14.503 casos de LER/DORT de origem laboral, segundo o Sistema Nacional de Agravos de Notificação (CENTRO DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Na tabela 2.1.1 são apresentados dados sobre aposentadorias urbanas no país, devido a doenças do sistema osteomuscular e do tecido conjuntivo, tomadas do Anuário Estatístico de Previdência Social dos anos 2009 a 2013. Observa-se que ao longo dos anos os casos de afastamento na população feminina superaram significativamente os da população masculina, pois em muitos casos mulheres realizam mais trabalhos repetitivos e que requerem maior esforço que homens, prevalecendo nas atividades de digitação e montagem (PICOLOTO; SILVEIRA, 2008).

Tabela 2.1.1. Quantidade e valor de aposentadorias urbanas por invalidez ativas, relacionadas a doenças do sistema osteomuscular e do tecido conjuntivo. Fonte: Anuário Estatístico de Previdência Social dos anos 2009 a 2013.

Anos	APOSENTADORIAS URBANAS POR INVALIDEZ CONCEDIDAS					
	Quantidade			Valor (R\$ Mil)		
	Total	Sexo		Total	Sexo	
		Masculino	Feminino		Masculino	Feminino
2009	137.191	64.721	72.432	55.744	31.015	24.715
2010	130.607	61.112	69.459	79.023	40.629	38.374
2011	123.866	57.520	66.311	80.340	41.111	39.208
2012	117.680	54.129	63.518	85.524	43.058	42.443
2013	111.348	50.804	60.513	87.822	43.823	43.976

Os LER/DORT relacionados ao trabalho são ocasionados pela exposição contínua a um ou mais fatores de risco, os quais são definidos como condições presentes no trabalho cuja presença é associada ao desconforto de trabalhadores. Tais riscos podem ser as causas diretas ou indiretas das doenças, sendo que sua presença não implica que os trabalhadores desenvolvam transtornos imediatamente; significa que aqueles que estão expostos a riscos têm maior chance de ficar doentes do que aqueles que não estão expostos. Múltiplos fatores de risco têm sido identificados como causas e catalizadores de LER/DORT. Já o Ministério de Saúde através da “Norma e manual técnico de Série A (2012)” que trata sobre lesões por esforços repetitivos e LER/DORT relacionados ao trabalho identifica os seguintes fatores de risco para o desenvolvimento dessas doenças:

- **Posto de trabalho:** Um posto de trabalho projetado inadequadamente pode obrigar ao trabalhador a adotar posições anatômicas incômodas.

- **Exposição a vibrações:** As vibrações afetam tendões, músculos, articulações e nervos. Os trabalhadores podem estar expostos a vibrações de corpo completo ou a vibrações localizadas. Vibrações de corpo completo são experimentadas por motoristas, por exemplo. Já as vibrações localizadas são causadas por ferramentas elétricas ou pneumáticas.
- **Exposição ao frio:** O frio diminui a sensação tátil assim como a força das mãos. Portanto, mesmo fazendo uso de equipamento adequado, o frio pode gerar sobre esforços para executar tarefas.
- **Pressão mecânica localizada:** Ocorre quando os tecidos moles de segmentos anatômicos e trajetos nervosos são comprimidos por contato direto com objetos duros e/ou pontiagudos.
- **Posturas:** Qualquer posição pode causar desconforto ou fadiga se é mantida por longos períodos de tempo. O principal fator que contribui ao desenvolvimento de LER/DORT está relacionado à posição do corpo: quando os segmentos corporais estão perto dos extremos de suas amplitudes de movimento, ocorrem distensões e compressão de tendões e nervos. Quanto mais tempo uma posição estática ou inadequada do corpo é adotada, maior a probabilidade de desenvolver LER/DORT.
- **Carga biomecânica:** Força mecânica exercida sobre estruturas osteomusculares, que em geral depende da magnitude da força, da área onde esta age e da força de atrito.
- **Carga estática:** Implica erguer um membro contra a gravidade, mantendo o músculo contraído sem repouso de forma prolongada. A execução de tarefas estáticas reduz o fluxo de sangue aos músculos, causando fadiga muscular.
- **Invariabilidade da tarefa:** Associada com repetição, envolve a execução de tarefas monótonas por tempos prolongados. O risco nestas atividades está associado à exigência das mesmas seções musculoesqueléticas.
- **Exigências cognitivas:** Grandes esforços mentais podem aumentar a carga em alguns segmentos musculoesqueléticos. Como exemplo prático: as pessoas envolvidas em

atividades de alto estresse tendem a apresentar bruxismo, um transtorno que, sem tratamento, leva a dores no pescoço e cabeça.

- **Fatores organizacionais e psicossociais ligados ao trabalho:** Refere-se a todos os fatores determinantes dos termos e condições do processo de trabalho. Fatores organizacionais podem ser por si fatores de risco de LER/DORT, mas também agem como determinantes dos fatores mencionados anteriormente. Fatores organizacionais nem sempre são fáceis de identificar. A carga de trabalho (quando imposta), o método de remuneração, o clima de trabalho, a qualidade das relações interpessoais podem também afetar o risco de desenvolvimento de LER/DORT ao gerar stress. O stress é um estado tanto fisiológico como psicológico. Ao trabalhar em um ambiente tenso ou com muito stress, há um aumento na tensão muscular que pode diretamente contribuir na carga musculoesquelética.

Na tabela 2.1.2. encontra-se uma compilação dos principais fatores de risco físico que podem ocasionar LER/DORT por segmento corporal.

Tabela 2.1.2. Fatores de risco de desenvolvimento de LER/DORT (1) por região corporal (2). Fonte: *Ergonomics - A Systems Approach*, Capítulo 1, pp. 6 – 7. (NUNES; BUSH, 2011)

1. 2.	PESCOÇO PESCOÇO/OMBRO	OMBRO	COTOVELO	MÃO – PUNHO	COSTAS	EXTREMIDADES INFERIORES
REPETIÇÃO	<ul style="list-style-type: none"> - Movimentos repetitivos do pescoço. - Movimento repetido dos braços ou ombros que geram carga na área pescoço – ombro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexão cíclica, extensão, ou rotação da articulação do ombro. 	<ul style="list-style-type: none"> - Flexão cíclica e extensão do cotovelo, ou pronacão, supinação, extensão e flexão do punho que gera cargas na área cotovelo – antebraço. 	<ul style="list-style-type: none"> - Movimentos repetitivos da mão – dedo ou do punho. Extensão – flexão e supinação ou pronacão do punho. - Repetições frequentes têm sido definidas como de tempo de ciclo < 30 s ou 50% do ciclo da tarefa executando a mesma atividade. 		<ul style="list-style-type: none"> - Ajoelhar-se, agachar-se, subir escadas. - Levantamento de cargas pesadas. Andar ou ficar em pé.
POSTURA	<ul style="list-style-type: none"> - Posturas extremas da cabeça e do pescoço. - Posturas estáticas da cabeça e/ou do pescoço. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quando o braço está flexionado, abduzido ou estendido, tal que o ângulo entre o torso e o braço aumenta. 	<ul style="list-style-type: none"> - Pronacão, supinação, flexão ou extensão repetida do punho, seja isoladamente ou em conjunto com extensão e flexão do cotovelo. 	<ul style="list-style-type: none"> - Postura não neutral da mão, punho e/ou flexão ou extensão de dedos – punho e agarre forte ou leve com a mão. 	<ul style="list-style-type: none"> - Posturas estáticas – isométricas onde ocorre pouco movimento, junto com posturas contraídas ou inativas. - Ficar sentado ou de pé por tempo prolongado (trabalho sedentário) - Posturas de tronco não neutras (relacionadas a flexão e torção) em posições extremas ou em ângulos extremos. 	

FORÇA	<p>- Esforços enérgicos, envolvendo a parte superior do corpo que gera cargas no trapézio e músculos do pescoço.</p>	<p>- Abdução do ombro, flexão, extensão ou rotação para exercer força.</p>	<p>- Atividades estrênuas envolvendo os flexores ou extensores do antebraço, os quais podem gerar cargas na região do cotovelo – antebraço.</p>	<p>Esforços enérgicos executados pela mão, com ou sem uma ferramenta de apoio durante tarefas de manuseio.</p>	<p>- Estresse físico que resulta do trabalho feito ao transferir objetos de um plano a outro. - Movimentos forçados tal como empurrar, puxar ou outros esforços.</p>	
VIBRAÇÃO		<p>- Vibrações de baixa ou alta frequência geralmente como resultado de ferramentas manuais.</p>		<p>- Trabalho manual envolvendo ferramentas manuais vibratórias.</p>	<p>- Vibração de corpo inteiro transferida ao corpo como um todo (em contraste com regiões do corpo específicas), usualmente através de sistemas de suporte tais como assentos ou plataformas.</p>	
FRÍO				<p>- Trabalhadores podem exercer mais força que a necessária, afetando músculos, tecidos moles e articulações. - O requerimento de luvas impacta na sensação levando a exercer força adicional.</p>		

Simoneau, St-Vincent e Chicoine (1996) apontam que “só a existência destes fatores de risco não é suficiente para abordá-los”, é necessário levar em consideração sua criticidade. Em geral, a criticidade destes fatores deriva de três moduladores: intensidade, frequência e duração.

A intensidade indica a magnitude com que um fator de risco se manifesta e que determinará a dimensão do esforço aplicado para a execução das tarefas. A frequência é o número de vezes que um trabalhador é exposto a um fator de risco durante a jornada laboral.

A terceira característica, a duração, tem um escopo mais amplo. Indica o tempo total que uma pessoa esteve exposta a um fator de risco durante um ciclo de trabalho, um turno de trabalho ou sua vida profissional. O tempo de exposição é proporcional à severidade do risco de trabalho.

Além dos fatores de risco físicos externos, existem fatores intrínsecos a cada pessoa. Nunes e Bush (2011) destacam que os fatores de risco individuais ou pessoais podem impactar na probabilidade de ocorrência de LER/DORT, pelo qual é necessário tomar cuidado:

- **Gênero:** Em geral, mulheres são mais propensas ao desenvolvimento de certos LER/DORT em comparação aos homens. Isso ocorre em parte pelas constantes mudanças hormonais em seus corpos, as quais alteram suas condições fisiológicas e contribuem com tais transtornos. Outras causas possíveis que incrementam a presença destes distúrbios em mulheres são a diferença em força muscular e antropometria.
- **Atividade física:** Em excesso pode causar lesões, porém a falta de exercícios pode incrementar o risco de desenvolvê-las. Também, no período pós-lesão, a ausência de atividade física pode reduzir a chance de desenvolver outros transtornos, mas dependendo do tipo de lesão, da condição física do indivíduo e da área afetada, em alguns casos a atividade pode acelerar o processo de recuperação.
- **Força:** Os levantamentos de cargas que excedem as capacidades dos trabalhadores podem ocasionar LER/DORT nas costas.
- **Antropometria:** No caso da antropometria, o peso, índice de massa corporal e obesidade têm sido identificados como fatores potencializadores de LER/DORT.

A respeito das doenças ocasionadas pela combinação destes riscos, Simoneau, St-Vincent e Chicoine (1996) afirmam que existem múltiplos LER/DORT por trabalho e a maioria deles são de caráter inflamatório. No Brasil, através do decreto previdenciário N° 3048 de 6 de maio de 1999 é regulada a cobertura da seguridade social em matéria de saúde dos trabalhadores. Nos anexos deste decreto estão listadas aquelas doenças do sistema osteomuscular e do tecido conjuntivo relacionadas ao trabalho junto com os fatores de risco de natureza ocupacional (Tabela 2.1.3).

Tabela 2.1.3. Doenças relacionadas ao trabalho e fatores de risco segundo a Previdência Social.

Fonte: Decreto previdenciário N° 3048 do 6 de Maio de 1999.

DOENÇAS	AGENTES ETIOLÓGICOS OU FATORES DE RISCO DE NATUREZA OCUPACIONAL
I - Artrite Reumatóide associada a Pneumoconiose dos Trabalhadores do Carvão: "Síndrome de Caplan".	1. Exposição ocupacional a poeiras de carvão mineral. 2. Exposição ocupacional a poeiras de sílica livre.
II - Gota induzida pelo chumbo.	Chumbo ou seus compostos tóxicos.
III - Outras Artroses.	Posições forçadas e gestos repetitivos.
IV - Outros transtornos articulares não classificados em outra parte: Dor Articular.	1. Posições forçadas e gestos repetitivos. 2. Vibrações localizadas.
V - Síndrome Cervicobraquial.	1. Posições forçadas e gestos repetitivos. 2. Vibrações localizadas.

VI - Dorsalgia: Cervicalgia; Ciática; Lumbago com Ciática.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Ritmo de trabalho penoso.
3. Condições difíceis de trabalho.

VII - Sinovites e Tenossinovites: Dedo em Gatilho; Tenossinovite do Estilóide Radial (De Quervain); Outras Sinovites e Tenossinovites; Sinovites e Tenossinovites, não especificadas.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Ritmo de trabalho penoso.
3. Condições difíceis de trabalho.

VIII - Transtornos dos tecidos moles relacionados com o uso, o uso excessivo e a pressão, de origem ocupacional: Sinovite Crepitante Crônica da mão e do punho; Bursite da Mão; Bursite do Olécrano; Outras Bursites do Cotovelo; Outras Bursites Pré-rotulianas; Outras Bursites do Joelho; Outros transtornos dos tecidos moles relacionados com o uso, o uso excessivo e a pressão; Transtorno não especificado dos tecidos moles, relacionados com o uso, o uso excessivo e a pressão.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Ritmo de trabalho penoso.
3. Condições difíceis de trabalho.

IX - Fibromatose da Fascia Palmar: “Contratura ou Moléstia de Dupuytren”.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Vibrações localizadas.

X - Lesões do Ombro: Capsulite Adesiva do Ombro (Ombro Congelado, Periartrite do Ombro); Síndrome do Manguito Rotatório ou Síndrome do Supraespinhoso; Tendinite Bicipital; Tendinite Calcificante do Ombro; Bursite do Ombro; Outras Lesões do Ombro; Lesões do Ombro, não especificadas.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Ritmo de trabalho penoso.
3. Vibrações localizadas.

XI - Outras entesopatias: Epicondilite Medial; Epicondilite lateral (“Cotovelo de Tenista”); Mialgia.

1. Posições forçadas e gestos repetitivos.
2. Vibrações localizadas.

XII - Outros transtornos especificados dos tecidos moles.	1. Posições forçadas e gestos repetitivos. 2. Vibrações localizadas.
XIII - Osteomalácia do Adulto induzida por drogas.	1. Cádmio ou seus compostos. 2. Fósforo e seus compostos.
XIV - Fluorose do Esqueleto.	Flúor e seus compostos tóxicos.
XV - Osteonecrose: Osteonecrose devida a drogas; Outras Osteonecroses secundárias.	1. Fósforo e seus compostos (Sesquissulfeto de Fósforo). 2. Vibrações localizadas. 3. Radiações ionizantes.
XVI - Osteólise (de falanges distais de quirodáctilos).	Cloreto de Vinila.
XVII - Osteonecrose no “Mal dos Caixões”.	“Ar Comprimido”.
XVIII - Doença de Kienböck do Adulto (Osteocondrose do Adulto do Semilunar do Carpo) e outras Osteocondropatias especificadas.	Vibrações localizadas.

Duas pessoas com um mesmo diagnóstico de LER/DORT podem ter diferentes manifestações clínicas. Assim, estas doenças também variam de acordo com a localização da dor, magnitude, momento de ocorrência, tempo de duração e consequências motoras. Fry (1986) propõe uma classificação por estágios destes transtornos que depende dos elementos anteriormente mencionados.

Tabela 2.1.4. Estágios dos LER/DORT de acordo com manifestações clínicas. Fonte: Fry (1986, p. 1)

ESTÁGIO	MANIFESTAÇÃO CLÍNICA
Grau I	Dor em uma área durante a realização da atividade geradora do desconforto
Grau II	Dor em múltiplas áreas durante a realização da atividade geradora do desconforto
Grau III	Dor com alguns outros usos do membro ou da área afetados, sensibilidade das áreas moles. Pode aparecer dor durante o descanso ou perda da função do músculo.
Grau IV	Dor com todos os usos do membro ou área afetada, dor pós-atividade durante ações menores, dor durante o descanso e durante a noite, signos físicos marcados de fragilidade, perda da função motora (perda do controle de resposta, debilidade).
Grau V	Perda da capacidade de use devido à dor contínua; perda da função do músculo; edemas persistentes; debilidade.

Na maioria dos casos, os LER/DORT são desenvolvidos por trabalhadores que laboram em ambientes onde o número de repetições está estreitamente relacionado com a produtividade laboral, por exemplo, em linhas de montagem, linhas de embalagem, linhas de corte, dentre outras. Seguidamente, o conceito de produtividade será abordado e será descrita sua relação com doenças relacionadas ao trabalho.

2.2. LER/DORT e produtividade em ambientes industriais

Em geral, a produtividade é definida como a relação entre as saídas geradas por um sistema de produção de bens ou serviços e as entradas utilizadas para criar tais saídas. Assim, quanto mais eficiente for o uso de recursos (mão de obra, capital, terreno, matérias, energia, informação, etc.) maior a produtividade. Embora sua definição possa mudar entre contextos, conceitualmente é sempre a relação entre qualidade e quantidade de bens e serviços produzidos e quantidade de recursos utilizados. Agora, é necessário diferenciar entre produtividade e intensidade laboral, já que enquanto a primeira reflete nos resultados do trabalho, a segunda indica excesso de esforço, em poucas palavras, trabalho acelerado, algo que não necessariamente leva a bons resultados (PROKOPENKO, 1987).

Dentro de ambientes industriais, a produtividade costuma estar entrelaçada às repetições de uma atividade, isso pois enquanto maior seja o número de vezes que uma tarefa é repetida, maior será o número de *outputs*. Se bem as tarefas repetitivas tem uma grande repercussão na efetividade de alguns sistemas como linhas de embalagem, corte ou montagem, quando são executadas de forma extensiva por trabalhadores podem representar um fator agravante no desenvolvimento de LER/DORT (KILBOM, 2000). Mesmo que as tarefas repetitivas não requeiram esforços excessivos, estas podem causar lesões pela carga biomecânica acumulada (QIN et al., 2014). Dependendo da severidade das lesões, os trabalhadores podem diminuir seu desempenho produtivo ou serem afastados, sendo que esta última implicação também traz prejuízos para a capacidade produtiva, pois seria necessário alocar as tarefas do trabalhador afastado a alguém que pode não ser tão experiente e precise de treinamento.

Além da perda de qualidade de vida, trabalhadores doentes causam custos econômicos e sociais às empresas, ligados ao absenteísmo, perda de produtividade, imagem pública, entre outros. (ASENSIO-CUESTA et al., 2012a). Especificamente em ambientes industriais, a repetitividade, a pouca variação, as posturas e vibrações localizadas têm sido identificados como fatores de risco para o desenvolvimento de LER/DORT (RAJABALIPOUR CHESHMEHGAZ et al., 2012); portanto, aspectos ergonômicos estão sendo cada vez mais levados em conta durante o projeto do trabalho nestes ambientes (OTTO; SCHOLL, 2011).

Xu et al. (2012) asseguram que as ações para a prevenção de LER/DORT em linhas de produção podem ser classificadas em duas categorias. Dentro da primeira categoria encontram-se as ações que buscam melhorar as condições de trabalho através de mudanças no projeto de produto e/ou trabalho.

As ações da segunda categoria distinguem-se pela variação de tarefas, dentro das quais está a rotação de postos de trabalho, que segundo a *Occupational Safety and Health Administration* (OSHA, 2009) é o “processo periódico de movimento de trabalhadores entre diferentes trabalhos ou tarefas para minimizar atividades monótonas e a sobrecarga de determinados tendões ou músculos”.

Além dos benefícios ergonômicos da rotação em linhas de produção, esta permite aumentar a flexibilidade da mão de obra e lidar com mudanças nas demandas (ERIKSSON; ORTEGA,

2006), diminuir o tédio (AZIZI; ZOLFAGHARI; LIANG, 2010) e aumentar a qualidade do produto (MICHALOS; MAKRIS; CHRYSSOLOURIS, 2013).

A implementação de programas de rotação de postos de trabalho que tentem minimizar o impacto dos riscos à saúde dos trabalhadores e/ou melhorar a produtividade em linhas têm sido consideravelmente discutida na academia e na indústria. Especificamente na academia, podem-se encontrar pesquisas onde programas de rotação são propostos com metodologias “técnicas” e “gerenciais”. Estas últimas são aquelas onde “não existe uma descrição algorítmica de métodos de solução” (VAN DEN BERGH et al., 2013) para a geração de programas ou esquemas de rotação, sendo desenvolvidos empiricamente. Dado o caráter “técnico” da presente pesquisa, nas seguintes subseções são abordados os métodos de estimação de risco ergonômico e de produtividade que podem ser incorporados em modelos matemáticos para a geração de programas de rotação de postos de trabalho em linhas de produção.

2.2.1. Métodos de estimação de risco ergonômico

Na literatura têm sido propostos diversos métodos de estimação para as condições relacionadas à ergonomia como planos, projeto de trabalho, sistemas, equipamentos, facilidades e condições existentes de vida de trabalho. Estes são conhecidos como *check-lists*, e são amplamente utilizados e recomendados por instituições nacionais e internacionais, sendo que quanto maior a quantidade de informação requerida, maior o detalhamento dos resultados. O propósito dos *check-lists* geralmente está relacionado a priorizar ações para o projeto ou reprojeto de tarefas, estudos comparativos e treinamento (KARWOWSKI, 2006). Já os resultados daqueles métodos que requerem menor esforço para serem aplicados servem para advertir que se é necessária a realização de estudos mais aprofundados. No entanto, a rapidez de aplicação e a simplicidade destas ferramentas são sua maior fraqueza. Geralmente, os *check-lists* são bastante incompletos, particularmente a respeito dos aspectos temporais do trabalho. Também, para poder aplicá-los é necessário ter um treinamento, geralmente oferecidos por escolas especializadas a preços consideravelmente altos. Já Bhattacharya e Mcglothlin (2012) apontam que o maior problema relacionado à utilização de *check-lists* é que eles só permitem identificar aquilo que está dentro da lista, deixando o objetivo primordial da ergonomia: compreender a atividade e suas especificidades. Desta forma se, por exemplo, um risco que não é característico de um posto de

trabalho é desconsiderado, pode ser que tal posto seja catalogado como “seguro”, quando na realidade as atividades ali executadas podem comprometer a saúde dos trabalhadores de outras formas. Por tal motivo, recomenda-se a combinação de ferramentas ao analisar postos de trabalho.

Como mencionado anteriormente, os *check-lists* somente indicam se existe ou não um problema, e não propõem recomendações para eliminar ou diminuir a exposição a riscos (KARWOWSKI; MARRAS, 1998); desta forma, sua utilização para a geração de rotações de postos de trabalho em linhas de produção implica um uso inteligente destes.

Para a avaliação de riscos ergonômicos em linhas de produção, os métodos que têm sido mais utilizados e incorporados como critérios de geração de programas de rotação através de abordagens matemáticas como modelagem são: *Job Severity Index (JSI)*; a equação revisada do *National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH)*; *Occupational Repetitive Actions Index (Índice OCRA)* e método Sue Rodgers. Estes métodos geralmente constituem a função objetivo dos modelos e/ou são incorporados como restrições. A seguir, estes métodos serão descritos brevemente, sendo de particular interesse para a presente pesquisa os métodos OCRA e Sue Rodgers, pois ambos são utilizados na formulação proposta. O primeiro permite quantificar a severidade dos riscos totais associados um posto de trabalho em uma escala que vai de 0 a 3,5 para riscos aceitáveis. O segundo quantifica a criticidade por segmentos corporais em uma escala de 1 a 3, onde 1 é criticidade baixa e 3 alta.

2.2.1.1. *Job Severity Index (JSI)*

Este índice, proposto por Ayoub em 1978 é descrito como “uma medida do estresse físico associado a tarefas de levantamento” (LILES et al., 1984). De forma simples, é a razão entre o peso que deve ser levantado e a capacidade de levantamento do trabalhador. Outros componentes que possuem um papel importante para o cálculo do índice são o tempo de exposição, frequência de levantamento e nível de levantamento. O JSI é explicitamente definido na equação 2.1, tomada de Liles (1986, p. 66):

$$JSI = \sum_{i=1}^n \frac{\text{Horas}_i \times \text{Dias}_i}{HT \times DT} \sum_{j=1}^{m_i} \frac{F_j \times WT_j}{F_i \times CAP_j} \quad (2.1)$$

Onde:

$i = 1, \dots, n$ É o número total de grupo de tarefas

$j = 1, \dots, m_i$ É o número total de tarefas no grupo i

Horas_i São as horas de exposição/dia para o grupo de tarefas i

Dias_i São os dias de exposição/semana para o grupo de tarefas i

HT São as horas totais/dia trabalhados

DT São os dias totais/semana trabalhados

WT_j É o peso máximo de levantamento requerido para a tarefa j

CAP_j É a capacidade ajustada da pessoa para a tarefa. A capacidade é dada como uma função do nível de levantamento, sexo, peso do trabalhador, força do braço, idade, altura dos ombros, força das costas, profundidade abdominal e resistência dinâmica.

F_j É a frequência de levantamento para a tarefa j .

F_i É a frequência total de levantamento para o grupo de tarefas i . Este valor é igual à somatória das frequências de levantamento para as tarefas j que pertencem ao grupo de tarefas i .

Como observado na descrição dos parâmetros da equação, no método considera-se que um trabalho está composto por grupos de tarefas de levantamento que são executadas em diferentes períodos. Tarefas que requerem abaixar, carregar, empurrar ou puxar cargas são excluídas no método (LILES, 1986).

Se o valor do JSI é igual ou excede 1,5 o risco de desenvolvimento de lesões lombares aumenta substancialmente. (LILES et al., 1984). De fato, Tharmmaphornphilas e Norman (2007) desenvolveram um modelo de regressão linear definida em partes que relaciona o valor do JSI de um trabalhador com o número de dias perdidos por afastamento. A regressão é apresentada na Equação 2.2:

$$\text{Número de dias perdidos por afastamento} = \begin{cases} 0,888 + 8,633x & \text{se } 0 \leq x < 1,5 \\ -547,5405 + 374,252x & \text{se } 1,5 \leq x < 1,6 \\ 20,047 + 19,51x & \text{se } x \geq 1,6 \end{cases} \quad (2.2)$$

2.2.1.2. Equação revisada de NIOSH

Da mesma forma que o JSI, a equação revisada de NIOSH permite avaliar as tarefas onde são executados levantamentos e abaixamentos de peso. Esta equação foi desenvolvida em 1981 pelo *National Institute for Occupational Safety and Health* (WATERS et al., 1993). Com a equação revisada é calculado o peso máximo recomendado para evitar lesões lombares, dadas certas condições de levantamento (Equação 2.3):

$$RWL = LC \times HM \times VM \times DM \times AM \times FM \times CM \quad (2.3)$$

Onde:

- RWL** *Recommended Weight Limit* ou peso máximo recomendado é o produto principal da equação. Este é definido por um conjunto específico de condições da tarefa.
- LC** *Lifting constant* é a constante de levantamento sob condições ótimas de levantamento segundo o autor. Este valor é igual a 23 kg.
- HM** *Horizontal Multiplier* é o parâmetro que penaliza os levantamentos na medida em que a carga levantada distancia-se do corpo.
- VM** *Vertical Multiplier* é calculado com base na distância vertical do levantamento, sendo que quando os levantamentos são feitos a partir de um ponto muito baixo ou até um ponto muito alto seu valor diminui.
- DM** *Distance Multiplier* é uma penalidade aplicada à distância vertical que as mãos percorrem desde o ponto de origem até o destino de levantamento.
- AM** *Asymmmetric Multiplier* diz respeito aos levantamentos onde é formado um ângulo entre o plano sagital e o plano de levantamento, ou seja, onde é requerida a torção do tronco.
- FM** *Frequency Multiplier* é calculado levando em consideração a frequência com que são feitos os levantamentos de uma tarefa.
- CM** *Coupling Multiplier* penaliza preensões de carga insuficientes, pois requerem forças de preensão maiores e diminuem o peso aceitável de levantamento.

Para estimar o estresse físico associado a cada tarefa de levantamento, é utilizado o índice de levantamento (*Lifting Index – LI*, equação 2.4). Este valor corresponde à razão entre o peso levantado e o peso máximo recomendado (RWL).

$$LI = \frac{\text{Peso da carga levantada}}{\text{Peso limite recomendado (RWL)}} \quad (2.4)$$

NIOSH estabelece faixas para os quais estes valores representam risco. Quando o LI é menor ou igual a 1 a tarefa não representa grande risco. Quando é maior que 1 e menor que 3 a tarefa pode ocasionar problemas e convém fazer intervenções sobre ela. Finalmente, quando é maior ou igual a 3 a tarefa ocasionará problemas e deve ser mudada (OTTO; SCHOLL, 2011).

2.2.1.3. Occupational Repetitive Actions (OCRA)

Desenvolvido por Occhipinti (1998), OCRA é um índice de que avalia os movimentos repetitivos nas extremidades superiores do corpo e que podem ocasionar lesões musculoesqueléticas. As extremidades superiores estão classificadas por segmentos anatômicos: ombro, cotovelo, punho e mão. Este método considera os hemisférios direito e esquerdo do corpo em separado, a menos que os movimentos executados sejam simétricos para ambos os lados. O índice OCRA é calculado de forma similar aos métodos anteriormente descritos (Equação 2.5):

$$\text{Índice OCRA} = \frac{\text{Número total de ações técnicas efetivamente executadas durante o turno}}{\text{Número total de ações técnicas recomendadas durante o turno}} \quad (2.5)$$

O número total de ações técnicas recomendadas durante o turno é calculado da seguinte forma (Equação 2.6):

$$\text{Ações técnicas recomendadas} = \left(\sum_{i=1}^n CF \times Ff_i \times Fp_i \times Fr_i \times Fa_i \times D_i \right) \times Ft \quad (2.6)$$

Na equação 2.6, $i = 1, \dots, n$ é o número de tarefas executadas que envolvem movimentos repetitivos nas extremidades superiores durante o turno de trabalho. Cada componente da equação é descrito na sequência.

Constante de frequência de ação (CF)

Segundo Occhipinti (1998) a frequência de execução de tarefas é o fator de risco que mais impacta nos membros superiores. Sob condições ótimas, o autor recomenda que este valor seja fixado em 30 ações por minuto (como parâmetro constante). No entanto, este valor pode ser modificado dependendo do contexto.

Fator de força (Ff)

O esforço requerido para realizar tarefas pode variar de pessoa a pessoa e incidir nas repetições com que pode ser feito. Tomando como base o esforço médio requerido (ou percebido) para realizar uma tarefa, são identificados os fatores multiplicadores para a força aplicada (Tabela 2.3.1):

Tabela 2.2.1. Elementos para determinar o fator força. Fonte: Occhipinti, 1998, p. 1295.

	Esforço médio percebido (na escala de Borg)	$\geq 0,5$	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5
Fator de força	Esforço médio (%) em termos de contração máxima voluntária	≥ 5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Fator Multiplicador		1	0,85	0,75	0,65	0,55	0,45	0,35	0,2	0,1	0,01

Fator postural (Fp)

Este componente considera as ações que envolvem posturas extremas das extremidades superiores. Combinações de posturas que excedam os valores mínimos (em tempo de ciclo) apresentados na tabela 2.3.2. são penalizados da seguinte forma:

Tabela 2.2.2. Elementos para determinar o fator multiplicador postural. Fonte: Otto e Scholl, 2011, p. 279.

Duração da postura durante o tempo de ciclo	$\leq 1/4$	1/3	1/2	2/3	3/3
Fator multiplicador para posturas severas	1	0,7	0,65	0,6	0,5
Fator multiplicador para posturas leves	1	1	1	0,7	0,6

A tabela anterior deve ser utilizada para a avaliação de todos os segmentos corporais mencionados, excetuando o ombro que deve ser analisado separadamente. Para calcular o índice OCRA, “a pontuação que represente maior penalização deve ser escolhida entre estes segmentos corporais” (OCCHIPINTI, 1998).

Fator repetitividade (Fr)

Se o tempo de ciclo de uma tarefa é inferior a 15 segundos e/ou se as mesmas ações nas extremidades superiores (ombro, cotovelo, punho e mão) são realizadas por mais de 50% do tempo de ciclo, então este valor é igual a 0,7. Caso contrário, é igual a 1 (OTTO; SCHOLL, 2011).

Fatores adicionais (Fa)

Este multiplicador abrange aqueles fatores de risco que estão presentes durante a execução das atividades e que têm sido identificados como fontes de LER/DORT nas extremidades superiores. Na tabela 2.3.3. são apresentados estes valores:

Tabela 2.2.3. Elementos multiplicadores dos fatores adicionais. Fonte: Otto e Scholl, 2011, p. 279.

Duração da exposição a fatores adicionais durante o tempo de ciclo	$\leq 1/4$	1/3	1/2	2/3	3/3
Fator multiplicador	1	0,95	0,925	0,9	0,8

Fator de recuperação (Ft)

Este fator é determinado levando em consideração o turno de trabalho em sua totalidade. Este multiplicador toma valores segundo as pausas ou intervalos de recuperação durante o turno de trabalho. A tabela 2.3.4. apresenta seus valores:

Tabela 2.2.4. Elementos multiplicadores do fator recuperação. Fonte: Occhipinti, 1998, p. 1297.

Número de horas sem recuperação adequada	0	1	2	3	4	5	6	7	8
Fator multiplicador	1	0,9	0,8	0,7	0,6	0,45	0,25	0,1	0

Quanto ao valor do índice OCRA, se este for menor ou igual a 2,2, o nível de risco das tarefas envolvidas é aceitável (verde). Se estiver entre 2,3 e 3,5 o risco é condicionalmente aceitável (amarelo). Enquanto se este valor é maior a 3,5 o nível de risco é inaceitável (vermelho).

2.2.1.4. Método Sue Rodgers

Da mesma forma que o método OCRA, o Método *Sue Rodgers* (RODGERS, 1988) permite avaliar os esforços repetitivos em grupos musculares quando são realizados entre 1 e 15 esforços por minuto. Neste método, a fadiga muscular depende do nível de esforço, da duração do esforço em segundos antes de relaxação e da frequência dos esforços (esforços por minuto). O método dá como resultado a prioridade de ações corretivas que devem ser feitas em cada posto de trabalho, dependendo das tarefas do posto e de seu impacto em cada grupo muscular.

No método é utilizada uma escala de 1 a 3 para valorar o nível de esforço percebido, a duração do esforço e a frequência dos esforços. Na sequência, é explicado como são obtidos estes valores para cada critério.

Nível de esforço

Este critério é avaliado por grupo muscular, com pontuações dependendo de sua intensidade: leve (1), moderado (2) ou forte (3). Na tabela 2.3.5 está a descrição dos critérios qualitativos levados em conta para valorar os esforços.

Tabela 2.2.5. Critérios para determinar os níveis de esforço por grupo muscular. Fonte: Chengalur, Rodgers e Bernard (2004, p. 150).

Região	Nível de esforço		
	Leve (1)	Moderado (2)	Forte (3)
Pescoço	Cabeça girada parcialmente a um lado, para trás ou levemente para frente	Cabeça girada a um lado; cabeça totalmente para trás; cabeça para frente a uns 20°.	Igual a moderado (2) mas com força ou peso; cabeça esticada para a frente.
Ombros	Braços ligeiramente longe do corpo; braços estendidos com algum apoio.	Braços longe do corpo sem suporte; trabalho realizado acima da cabeça.	Exercer forças ou segurar peso com os braços longe do corpo ou acima da cabeça.
Costas	Inclinação a um lado ou flexão arqueando as costas.	Inclinação para frente sem carga; elevação de cargas moderadamente pesadas perto do corpo; trabalho realizado por	Levantar ou exercer forças ao torcer as costas; alta força ou carga enquanto se está inclinado.

		cima da cabeça.	
Braços/ Cotovelos	Braços longe do corpo, sem carga; forças leves de elevação de carga perto do corpo.	Girar os braços enquanto exercer uma força moderada.	Exercer grande força com rotação; levantamentos de carga com os braços estendidos.
Punho/ Mãos/ Dedos	Forças leves ou pesos manuseados perto do corpo; pulsos retos; preensão confortável.	Cabos com larga ou estreita envergadura; ângulos de risco no punho moderados, especialmente flexão; uso de luvas com força moderada.	Preensão forte; ângulos acentuados de giro no pulso; superfícies escorregadias.
Pernas/ Joelhos/ Tornozelos/ Pés/ Dedos do pé	Ficar em pé, caminhar sem dobrar-se ou inclinar-se; peso em ambos os pés	Inclinação para frente, inclinação sobre uma mesa; peso sobre um lado; pivotar enquanto exerce força	Exercer grande força ao puxar ou levantar carga; agachar-se enquanto força é exercida.

Duração do esforço

Neste critério, a duração do esforço é pontuada na escala de 1 a 3 para cada grupo muscular daqueles anteriormente mencionados. A duração do esforço é considerada leve se dura menos de 6 segundos. Se a duração for maior ou igual a 6 segundos ou menor ou igual a 20 segundos, é pontuada como moderada. Já se esta for maior que 20 segundos é catalogada como forte.

Frequência do esforço

Consecutivamente, a frequência do esforço deve ser pontuada na mesma escala de 1 a 3, sendo que esta corresponde ao número de esforços feitos por minuto em cada grupo muscular. Se menos de 1 esforço por minuto é feito, este componente é considerado leve. Se os esforços por minuto forem maiores ou iguais a 1 e menores ou iguais a 5, a pontuação é moderada. Agora, se os esforços forem maiores a 5 por minuto, a pontuação é forte.

Para determinar a prioridade de ação associada a cada grupo de tarefas por segmento corporal, deve-se obter as combinações respectivas das pontuações encontradas nos componentes nível de esforço, duração de esforço e frequência do esforço. A tabela 2.3.6. apresenta as combinações e a prioridade de ação associada:

Tabela 2.2.6. Prioridade de ação de acordo às combinações de nível, duração e frequência de esforço. Fonte: Chengalur, Rodgers e Bernard (2004, p. 151).

COMBINAÇÕES DE NÍVEL, DURAÇÃO E FREQUÊNCIA DE ESFORÇO E PRIORIDADE ASSOCIADA			
Prioridade Baixa	Prioridade Moderada	Prioridade Alta	Prioridade Muito Alta
1,1,1	1,2,3	2,2,3	3,2,3
1,1,2	1,3,2	3,1,3	3,3,1
1,1,3	2,1,3	3,2,1	3,3,2
2,1,1	2,2,2	3,2,2	
1,2,1	2,3,1		
2,1,2	2,3,2		
3,1,1	3,1,2		
1,2,2			
1,3,1			
2,2,1			

Assim, se por exemplo, uma atividade atinge uma pontuação de 1 em nível de esforço, 3 em duração do esforço e 2 em frequência do esforço para um dos grupos musculares mencionados, então considera-se que a prioridade da ação e, portanto, sua criticidade é moderada. Já se alcançasse uma pontuação de 3, 1 e 3 para nível de esforço, duração do esforço e frequência do esforço respectivamente, a prioridade da ação para o grupo muscular analisado seria alta.

Neste método, também é possível fazer distinção entre os hemisférios corporais (direita e esquerda) sempre e quando os esforços não forem simétricos.

2.2.2. Métodos de incorporação de produtividade

Quando algumas tarefas têm certo grau de complexidade, nem todos os trabalhadores são suficientemente habilidosos para realizá-las de forma adequada em tempos aceitáveis. Portanto, considera-se que os trabalhadores possuem capacidades heterogêneas. Na literatura, encontram-se pesquisas onde os critérios de classificação do pessoal são baseados em suas habilidades, experiência, tempo de ciclo, curvas de aprendizagem e taxa de produção.

As **habilidades** correspondem às competências de um trabalhador para executar tarefas. Um trabalhador pode ser capaz de desempenhar só uma tarefa ou múltiplas. Neste último caso, o trabalhador é considerado polivalente (*multiskilled*). Tendo um conjunto de trabalhadores polivalentes, a força de trabalho é mais flexível.

Para a inclusão dessa característica na modelagem matemática, inicialmente define-se um conjunto de habilidades requeridas. Os trabalhadores e postos de trabalho/tarefas, por sua parte, são classificados segundo as habilidades que possuem e que requerem respectivamente. Assim, os problemas são resolvidos designando trabalhadores a postos de trabalho/tarefas que satisfaçam as exigências de habilidades [(AVRAMIDIS; CHAN; L'ECUYER, 2009), (AKBARI; ZANDIEH; DORRI, 2012), (ARYANEZHAD et al., 2008)].

A **experiência** indica o tempo que uma pessoa tem permanecido em um cargo/posto de trabalho/tarefa dentro de uma organização. Considera-se que na medida em que maior seja a experiência de uma pessoa, mais conhecimento esta tem sobre suas funções e, portanto, é mais produtiva. Os modelos que lidam com esta característica, que na literatura são poucos (HOJATI, 2010), geralmente tentam maximizar a satisfação dos trabalhadores mais antigos nas decisões de alocação a turnos ou postos de trabalho [(VOLGENANT, 2004), (HOJATI, 2010), (AKBARI; ZANDIEH; DORRI, 2012)].

O **tempo de ciclo** pode ser considerado como o tempo entre finalizações (ou começos) de um estágio de um processo ou o tempo requerido para produzir uma unidade desde o começo até o fim (HILL, 2012). Com ênfase na segunda definição, na literatura encontram-se modelos onde os tempos de ciclo de produtos, processos e projetos são minimizados através da correta alocação de trabalhadores a tarefas ou cargos. Para isso, os tempos de processamento de cada trabalhador, ou grupo de trabalhadores, ao executar suas tarefas são incluídos na modelagem [(ANZANELLO; FOGLIATTO; SANTOS, 2014), (MOREIRA; COSTA, 2013), (COSTA; MIRALLES, 2009)].

As **curvas de aprendizagem** descrevem o grau de aprendizado através do tempo. Estas podem ser expressas como funções matemáticas que simulam o desempenho dos trabalhadores durante a execução de tarefas repetitivas, sendo que quanto maior for o número de repetições, menor será o tempo de processamento (GUIMARÃES; ANZANELLO; RENNEN, 2012). Esta abordagem tem sido incluída em modelos matemáticos como estratégia de monitoramento do

desempenho de trabalhadores, para analisar e controlar operações produtivas e como base para alocar trabalhadores a cargos dependendo de seus perfis de aprendizagem [(ANZANELLO; FOGLIATTO, 2011), (ANZANELLO; FOGLIATTO; SANTOS, 2014), (AZIZI; ZOLFAGHARI; LIANG, 2010)].

A **taxa de produção** refere-se ao número de unidades que são produzidas em um período de tempo. Na modelagem, comumente associa-se trabalhadores ou grupo de trabalhadores com taxas de produção, a fim de garantir que os *outputs* satisfaçam demandas periódicas (MORTON; POPOVA, 2004). Sendo esta forma de medição de produtividade a mais ajustada ao problema a tratar, é incorporada por meio de um conjunto de restrições na modelagem.

3. DESCRIÇÃO DO PROBLEMA

A empresa cujas informações foram utilizadas para avaliar a metodologia proposta é uma multinacional presente no Brasil, que produz equipamentos agrícolas como tratores de pequena, média e grande potência, colheitadeiras de grãos, pulverizadores e equipamentos para feno e forragem. No Brasil está localizada uma de suas duas fábricas na América do Sul.

Na região de Sorocaba (SP) a empresa tem seu mais importante centro de distribuição (CD) no hemisfério sul, o qual atende todos os clientes da América Latina. Ali, são movimentados itens de todo tipo, inclusive peças de modelos que foram retirados do mercado. No total, mais de 170.000 produtos devem ser recebidos, embalados, armazenados e enviados até o cliente final, sendo que é necessário classificar os produtos por famílias dependendo de sua rotatividade, dimensões, embalagem, função das peças, entre outras características.

Especificamente na área de embalagem, em cada linha é processado um mesmo tipo de família de peças. Assim, por exemplo, os itens de menor tamanho e que não precisam de muita proteção são embalados em sacolas plásticas transparentes na linha chamada de “autobag”, em referência à máquina que auxilia o processo. Todas as linhas são independentes e não precisam de transferência de material ou produtos entre elas.

Mesmo com a assistência de equipamentos, dentro dessa área é feito o trabalho mais repetitivo e de maior esforço físico dentro do CD, dando lugar a um pequeno número de registros de desconforto, nenhum deles incapacitante até o momento. Cientes de tal situação, a empresa conta com trabalhadores encarregados da análise ergonômica, onde são utilizadas diversas ferramentas para avaliar os riscos associados aos postos de trabalho que conformam as diversas linhas de embalagem. Uma das ferramentas utilizadas é o índice OCRA, onde são avaliados os esforços por repetições. Três linhas em específico atingem a maior pontuação desse índice: 1) Autobag, 2) Caixa Cartão e 3) Forno (Figura 3.1). Estas linhas estão localizadas perto da entrada de materiais. Em relação à sua configuração, as linhas são paralelas entre si e os postos de trabalho que compõem cada linha são agrupados em fileiras. Os trabalhadores da área estão capacitados para exercer todas as funções como uma medida de flexibilizar a mão-de-obra. Seguidamente é feita uma descrição das linhas:

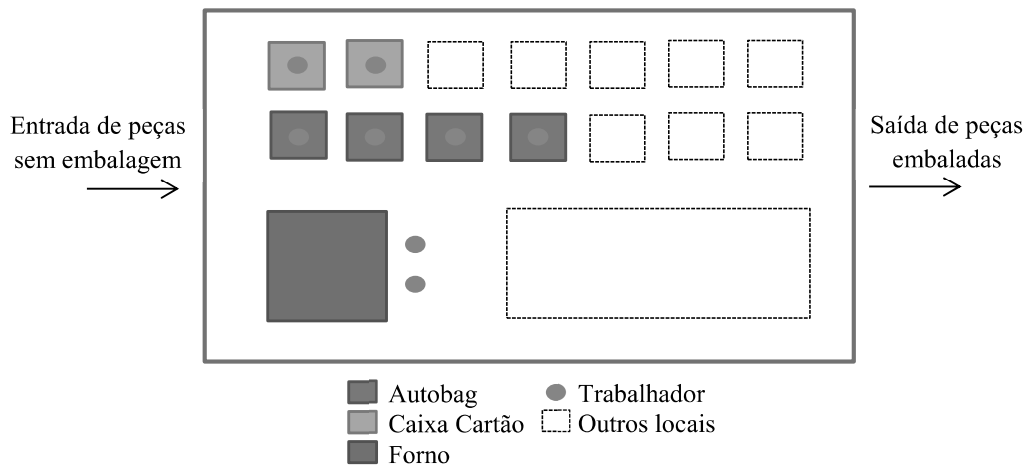


Figura 3.1. Representação do layout das linhas estudadas. Fonte: Elaboração própria.

Autobag

Nessa linha, são embaladas as peças de menor tamanho (como parafusos e porcas), onde os trabalhadores devem executar vários micro-movimentos. Esta linha está formada por quatro postos de trabalho, onde opera um trabalhador por posto de forma independente dos colaboradores da linha. Em cada posto, os operadores devem aguardar até as peças chegarem dentro de uma caixa. Uma vez recebidas, o código dentro da caixa é inserido em um computador para poder imprimir as etiquetas que devem ir na embalagem. São feitos ajustes nas máquinas auxiliares para elas ficarem próximas ao operador. Finalizados os ajustes, a operação de embalagem começa: os operadores retiram da caixa o número de peças que devem embalar juntas, as colocam em um saquinho plástico transparente fornecido pela máquina “autobag” que o fecha uma vez que as peças estão dentro. Depois, imprimem e colam a etiqueta no saquinho e o coloca em uma outra caixa de plástico, e assim os operadores continuam até embalar todas as peças. Ao final do processo, o operador deve ir até um computador central e informar a produtividade (número de peças processadas/tempo em que foram processadas), carimbar a caixa onde estão todos os produtos embalados, levar a caixa até um carrinho e voltar ao posto para receber um novo lote de peças. Nesta linha, os riscos associados aos postos que a compõem são condicionalmente aceitáveis, pois o valor do índice OCRA para cada um deles é de 2,3. Já com o método Sue Rodgers, encontra-se que para cada um dos grupos musculares avaliados (Costas;

Ombros; Braços e cotovelos; Mão, punho e dedos; Membros inferiores) as pontuações oscilaram entre 1 e 2, não representando maior risco para a saúde física dos trabalhadores.

Forno

Esta linha está composta por dois postos de trabalho também independentes. Os itens aqui são pré-embalados e disponibilizados para outra linha que não faz parte do presente estudo. As peças aqui processadas são mais pesadas e ocasionalmente volumosas. O processo inicia de forma similar ao da linha anteriormente descrita: os operadores devem aguardar os itens chegarem, tomar o código dentro do pallet onde chegaram os itens, ingressá-lo no computador para na sequência, imprimi-lo. Uma vez recebidos todos os itens, estes são colocados numa mesa, embalados com um material especial para protegê-los por mais tempo contra a corrosão (VCI) e colocados dentro de um forno industrial por aproximadamente 5 minutos. Transcorrido este tempo, os itens são retirados do forno e colocados em um carrinho. Estes são transportados até a máquina que imprime os códigos, onde o operador os imprime e coloca manualmente em cada item embalado. Depois, o operador vai até o computador central para registrar os dados sobre sua produtividade, e disponibiliza as peças para serem transportadas até a próxima estação. Neste posto de trabalho, mais do que movimentos repetitivos, são feitos levantamentos de materiais pesados. Assim, com a avaliação do índice OCRA os postos dessa linha alcançaram uma pontuação de 3,1, um valor condicionalmente aceitável e que está próximo ao limite máximo (3,5). Por outro lado, com o método Sue Rodgers os postos da linha alcançaram uma pontuação de 3 para um grupo muscular: as costas. Tal situação ocorre, pois os trabalhadores muitas vezes levantam cargas pesadas em posições de inclinação, durante períodos de mais de 6 segundos. Em algumas ocasiões foi identificado que os trabalhadores executavam mais de 5 esforços por minuto, especialmente quando chegavam lotes grandes. Para os outros grupos musculares, a pontuação esteve entre 1 e 2.

Caixa Cartão

Nesta linha, composta por dois postos de trabalho, as peças (como bobinas e rolamentos) são maiores que na linha de *autobag* e menores que na linha de forno. O procedimento inicial é similar ao das outras linhas: uma vez que as peças são disponibilizadas no posto de trabalho, o código de identificação é cadastrado no computador e as etiquetas que as identificarão são

impressas. Depois, cada peça metálica que requer de proteção adicional é envolvida em material VCI e colocada em um saco plástico. Uma vez colocadas todas as peças em sacos, começa a operação de etiquetagem. Finalizada a operação, as peças pré-embaladas são colocadas em caixas e são movimentadas para a próxima área (seja o armazém ou a área de transporte). Por último, o operador deve ir até o computador central e cadastrar os dados sobre sua produtividade e voltar ao posto para receber uma nova ordem de peças. De acordo com a informação fornecida pela empresa, nesta linha os riscos físicos envolvidos são aceitáveis, pois a pontuação obtida com a avaliação OCRA foi de 2,1. Já com o método Sue Rodgers foi encontrado que para os punhos, mãos e dedos a pontuação foi de dois, enquanto que para os demais grupos musculares foi de 1.

3.1. Produtividade no sistema

Mensalmente, nas linhas de embalagem são processadas diferentes quantidades de peças dependendo da época do ano. No caso de máquinas agrícolas, por exemplo, a maior demanda de peças de reposição ocorre durante e após a época de plantio e colheita. Na tabela 2.2.1 estão listadas o número de unidades processadas em cada linha mensalmente. Em média, espera-se que nas linhas de forno, *autobag* e caixa cartão sejam processadas 4.381, 61.709 e 4.290 unidades por semana, respectivamente.

Tabela 3.1.1. Unidades embaladas mensalmente em cada linha durante o ano de 2014. Fonte:

Empresa

LINHA	UNIDADES EMBALADAS/MÊS (ANO 2014)					
	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN
Forno	13.321	16.030	60.636	21.629	27.494	13.592
Autobag	304.126	256.925	292.436	312.578	276.669	217.840
Caixa cartão	24.400	24.615	26.198	39.056	23.001	22.535
LINHA	UNIDADES EMBALADAS/MÊS (ANO 2014)					
	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
Forno	21.504	17.240	22.507	16.479	249	674
Autobag	267.485	295.812	305.043	232.360	185.822	311.140
Caixa cartão	18.420	5.643	7.742	12.324	16.044	6.558

Os trabalhadores produzem em ritmos diferentes, dependendo do número de unidades que devem processar, tendo taxas de produção que podem ser descritas por distribuições de probabilidade. Com as amostras da taxa de produção de cada trabalhador fornecidas pela empresa, foi calculada a distribuição de probabilidade que descreve a produtividade de oito trabalhadores rotativos (cinco mulheres e dois homens) ao terem níveis de demanda flutuantes (Tabela 3.1.2). A ferramenta StatFit do software ProModel Student versão 8.5.1 foi utilizada para fazer a análise. As distribuições expressam o número de unidades que cada um deles consegue processar em um minuto, dependendo da linha e de condições ideais (lembrando que em total há oito postos de trabalho, dois nas linhas de forno e caixa cartão e quatro na linha de *autobag*).

Tabela 3.1.2. Distribuição de probabilidade da produtividade dos trabalhadores que rotacionam nas linhas estudadas. Fonte: elaboração própria.

TRABALHADOR	LINHA		
	<i>Autobag</i>	<i>Forno</i>	<i>Caixa cartão</i>
1	Normal(8.44, 1.2)	Normal(1.86, 0.416)	Normal(1.33, 0.633)
2	Normal(8.18, 1.16)	Normal(1.78, 0.397)	Normal(1.38, 0.656)
3	Normal(7.59, 1.08)	Normal(1.8, 0.403)	Normal(1.41, 0.671)
4	Normal(8.14, 1.16)	Normal(2.03, 0.454)	Normal(1.46, 0.694)
5	Normal(7.66, 1.09)	Normal(1.84, 0.412)	Normal(1.51, 0.716)
6	Normal(7.9, 1.12)	Normal(1.81, 0.404)	Normal(1.34, 0.637)
7	Normal(8.27, 1.17)	Normal(1.87, 0.418)	Normal(1.5, 0.712)
8	Normal(7.83, 1.11)	Normal(1.91, 0.427)	Normal(1.43, 0.679)

Alguns trabalhadores conseguem produzir muito mais do que outros em algumas linhas, gerando-se uma tendência de trocá-los de postos de trabalho com pouca frequência, em especial quando há muitas unidades a serem embaladas. Tal tendência é mais marcante na linha de *autobag*.

3.2. Paradas no sistema

Como em todo sistema real, ocorrem imprevistos que podem interromper o percurso normal das atividades. O caso estudado não é uma exceção. Paradas de diversas origens ocorrem diariamente, comprometendo a produtividade do sistema. Em particular, têm sido identificados os seguintes tipos de paradas:

- Paradas por acidentes
- Paradas por abastecimento da linha
- Paradas por quebra de equipamentos ou dispositivos
- Paradas por treinamentos
- Paradas por reuniões
- Paradas por *set-up* (por exemplo, troca de baterias, ajustes nos equipamentos)
- Paradas por falta de insumos
- Paradas por movimentação lenta de peças
- Paradas por retrabalho
- Paradas por atividades fora do posto de trabalho (ir ao banheiro, por exemplo)
- Paradas por manutenção do sistema
- Paradas por limpeza e organização
- Paradas por espera
- Outros tipos de paradas

Uma vez que é quase impossível evitar este tipo de ocorrências, efetuar o controle pode ajudar a planejar a melhor forma de como será organizado o trabalho. Com os dados fornecidos pela empresa, foi calculada a distribuição de probabilidade que indica o número de paradas que podem acontecer em cada posto dependendo da linha, a probabilidade de ocorrência de cada tipo de parada em cada linha, a distribuição de probabilidade que descreve a duração de cada tipo de parada em cada linha e distribuição de probabilidade que especifica o tempo entre paradas por linha.

3.3. Organização de trabalho

Como foi mencionado anteriormente, os trabalhadores dessas linhas são polivalentes. No entanto, os trabalhadores rotacionam pouco, mais por questões de produtividade do que por preferências. Desta forma, evidencia-se a necessidade de propor uma forma de alternativa de designação de atividades que permita diminuir a exposição dos trabalhadores a riscos físicos (que no caso estão presentes) sem deixar de atender aos quesitos de produtividade. Assim, um programa de rotação com objetivos ergonômicos e de produtividade, ajustado o mais possível à realidade é uma boa alternativa temporária e de baixo custo que pode ser implementada enquanto são analisados os problemas relacionados ao *design* de tarefas e atividades nos postos.

4. REVISÃO DA LITERATURA

Inúmeros estudos já abordaram as rotações como alternativa de organização de trabalho. Koike (1984), por exemplo, afirmou que na década de 1950 as empresas japonesas já praticavam a rotação de postos de trabalho para ter maior flexibilidade de mão de obra. Adicionalmente, nos Estados Unidos esta estratégia, entre outras, foi adotada para tentar atingir o mesmo nível de sucesso dos japoneses nessa época (COŞGEL; MICELI, 1999).

Os primeiros estudos sobre quão difundida estava a rotação de postos de trabalho (dentre outras estratégias de organização do trabalho) na indústria dos Estados Unidos datam da década de 90 e foram conduzidos por Osterman (1994) e Gittleman, Horrigan e Joyce (1998). Eles descobriram que sua implementação estava relacionada a aumentar a competitividade internacional e flexibilidade, o uso de tecnologias que demandam habilidade e a execução de estratégias que enfatizam a variedade. Em países europeus, muitas organizações têm adotado as rotações como ferramenta para incentivar o trabalhador, incrementar sua aprendizagem (e, portanto, seu desempenho), para conhecer mais a fundo suas capacidades e saber onde opera melhor (ERIKSSON; ORTEGA, 2006). No entanto, mesmo que as rotações tenham o objetivo de impulsionar a aprendizagem e o desenvolvimento de habilidades, também podem aumentar a carga de trabalho sem que exista uma compensação, especialmente quando se trata de trabalhadores diretamente envolvidos na produção de bens ou serviços e quando os pontos de vista dos envolvidos não são considerados (SHIN, 2009). De fato, Aptel et al., (2008) já tinha observado que para garantir sua satisfação e que a carga e pressão de trabalho não sejam percebidas como rigorosas é necessária a participação dos trabalhadores na geração de programas de rotação.

Um exemplo de sucesso de rotações devido à participação dos trabalhadores é apresentado por Rissén et al. (2002). As participantes do estudo foram trabalhadoras de um supermercado que tinham reportado sentir estresse e tédio pela monotonia das atividades, assim como a ocorrência de LER/DORT. Assim, após a implementação da rotação, as envolvidas reportaram aumento na apreciação das atividades, um impacto positivo na percepção subjetiva dos trabalhadores e um efeito positivo sobre a atividade muscular de pescoço e ombros devido à variação na utilização dos grupos musculares. Este último resultado corrobora com as conclusões obtidas por Frazer et al. (2003) e Aptel et al., (2008): é necessário que exista variação nas demandas físicas para que as rotações possam ser eficientes do ponto de vista ergonômico. Os autores apontam que se, por

exemplo, um trabalhador troca entre dois ou mais postos com alta exigência para o mesmo grupo muscular, a rotação resultará ineficiente.

Levando em consideração a variação de movimentos, Raina e Dickerson (2009) tentaram determinar a efetividade das rotações ao expor um mesmo grupo muscular (no caso, o músculo deltoide) a dois tipos de tarefas com diferentes demandas físicas. Embora não terem sido encontradas diferenças significativas, os autores concluíram que é menos desgastante alternar entre duas tarefas de diferentes demandas físicas a somente permanecer executando uma tarefa de alta demanda muscular. Já este resultado foi confirmado por Keir, Sanei e Holmes (2011). Eles avaliaram os efeitos da rotação de postos de trabalho nas costas, na atividade muscular no antebraço e no esforço percebido durante a execução de tarefas que envolvem levantamento e preensão palmar. Os participantes realizaram tarefas repetitivas de levantamento, abaixamento e preensão, executando diversas combinações. Os resultados indicaram que ao exercer de forma consecutiva a mesma atividade foram gerados maiores impactos negativos, enquanto que a ordem das combinações mistas de levantamento/abaixamento/preensão não teve um efeito significativo nos grupos musculares. Horton, Nussbaum e Agnew (2012) também concluíram que é melhor variar tarefas dentro da jornada de trabalho do que permanecer executando a tarefa de maior carga física. Os autores reportaram que a ordem das tarefas tem influência na fadiga muscular e que ao começar a jornada com tarefas de maior demanda foi associado com uma maior fadiga muscular.

As pesquisas sobre o efeito da rotação no desenvolvimento de LER/DORT ponderam fatores como o tipo de atividade executada, características do trabalhador, grupos musculares, entre outros. Kuijer, Visser e Kemper (1999) estudaram o efeito das rotações de postos de trabalho na carga física de trabalho em funcionários do departamento de coleta de uma empresa pública de limpeza. O objetivo da introdução das rotações foi dividir equitativamente a carga de trabalho referente à coleta de lixo entre os funcionários. Grupos de trabalhadores rotativos e não rotativos foram comparados. A carga de trabalho físico foi determinada através da medição da carga percebida, a carga energética e a carga postural durante um dia de trabalho. Os autores consideraram que seu objetivo não foi atingido totalmente, pois embora a rotação reduzisse significativamente a carga percebida e a carga energética, e ligeiramente a carga postural, os trabalhadores não rotativos tiveram maior produtividade devido ao grau de especialização que

adquiriram. Cabe adicionar que pode não existir relação entre os indicadores de saúde utilizados pelos autores com o risco de desenvolver LER/DORT, como apontam Sato e Coury (2009). As autoras compararam trabalhadores expostos a variação de tarefas por meio de indicadores de saúde de longo prazo (tais como afastamentos por LER/DORT) e de curto prazo (tais como desconforto e percepção de esforço) Os resultados indicaram que não houve diferença de percepções de esforço e desconforto entre os trabalhadores afastados e os não afastados. No entanto, as autoras enfatizam a necessidade de utilizar indicadores mais precisos para a avaliação de postos de trabalho rotativos, devido à alta variabilidade de carga e demandas de trabalho.

Wells, Mcfall e Dickerson (2010) tentaram determinar se existem tarefas manuais com variabilidade suficiente para produzir o efeito de descanso aos trabalhadores ao serem rotacionados entre elas. Os autores avaliaram a hipótese das tarefas contribuírem para a redução da fadiga, aumento da capacidade de trabalho e, potencialmente, prevenção de lesões musculoesqueléticas. Rotações entre tarefas manuais foram feitas e as forças de máxima contração muscular voluntária foram mensuradas. Os resultados encontrados confirmaram que existe variação suficiente das tarefas manuais para sua utilização em rotações de postos de trabalho.

Rademacher et al. (2012) estudaram a relação entre a idade de trabalhadores, sua capacidade física e tempo de exposição a riscos mecânicos ao longo da sua vida laboral em uma empresa do setor automotivo. Os riscos abordados foram associados a manuseio de materiais, posturas adotadas e forças aplicadas, que podem incidir nas costas, à área de ombro/pescoço e às extremidades superiores. Os resultados indicaram que tanto a idade como a capacidade física (em especial esta última) influenciam na exposição a riscos mecânicos. Os autores aconselharam considerar estes aspectos ao planejar programas de rotação, para minimizar tais riscos.

Filus e Okimorto (2012) estudaram o efeito dos intervalos de rotação de postos de trabalho na fadiga muscular, entendendo-se “intervalo” como o tempo de permanência de um trabalhador em um posto de trabalho. Para tal, os autores fizeram medições dos níveis de ácido láctico no corpo dos trabalhadores e conduziram uma *survey* sobre percepção da fadiga muscular. O ácido láctico é um composto produzido pelo organismo durante as atividades físicas, e que, em altas concentrações, contribui com o cansaço muscular. Dois grupos foram avaliados: no primeiro, as medições foram feitas no começo e no final de cada intervalo de rotação; no segundo, ocorreram

no começo e no final de cada turno de trabalho. Durante a primeira semana de medição, o comprimento dos intervalos de rotação foi de uma hora; na segunda semana de duas horas e finalmente, na terceira semana de três horas. Os resultados foram similares aos de Tharmmaphornphilas e Norman (2004), pois foi encontrado que durante intervalos de rotação de uma e duas horas, os trabalhadores produzem menos ácido láctico que em aqueles de maior duração, sendo que ao rotacionar a cada três horas, as concentrações de ácido láctico nos trabalhadores se elevaram em até 70%, dependendo da atividade.

Mesmo com as evidências que apoiam a rotação como mecanismo de prevenção de LER/DORT, alguns autores alegam que, de fato, não há evidência consistente, como no caso de Luger et al. (2014) e Leider et al. (2015). Várias explicações são dadas para isso. A primeira é a falta de estudos de longo prazo com controle do estado de saúde física dos trabalhadores à medida que as rotações são realizadas. Outra explicação está relacionada com as diferentes condições em que foram conduzidos os estudos sobre rotações e as diferentes demandas de trabalho reportadas em cada um deles. Adicionalmente, os trabalhadores que são beneficiados das rotações são aqueles que costumavam ficar expostos a tarefas de maior demanda, sendo que os que geralmente estavam designados em tarefas de menor demanda reportaram maior fadiga. Por último, os autores indicam que, ao existir um problema na confiabilidade da execução das rotações durante a realização de algumas pesquisas.

Há autores que afirmam que qualquer tipo de rotação interfere na produtividade, pois na medida em que um trabalhador fica por mais tempo executando uma tarefa, ganha mais experiência e consegue assim fazê-la de forma mais rápida (WINKEL; WESTGAARD, 1996). Com a motivação de comprovar esta afirmação, Guimarães, Anzanello e Renner (2012), através da utilização de um modelo de curva de aprendizagem, tentaram determinar se o desempenho dos trabalhadores era afetado ao fazer rotações de tarefas de diferente complexidade. Nos resultados, não foram exibidas diferenças significativas na mudança de seu desempenho, independentemente da complexidade das tarefas que executavam. Com base nestes resultados e com o apoio de uma análise macroergonômica do trabalho, os autores introduziram um enfoque multifuncional e de trabalho em equipe nas linhas, simultaneamente às rotações de tarefas. Após estas mudanças, melhorias significativas surgiram no ambiente de trabalho como a redução do absenteísmo, de

LER/DORT relacionados ao trabalho, retrabalho, resíduos e aumento da motivação dos trabalhadores.

A respeito da qualidade do produto, rotações mal executadas, onde não sejam considerados aspectos como a aptidão dos trabalhadores, suas preferências e limitações ou suas opiniões, podem levar a problemas no produto final (JORGENSEN et al., 2005), o que justifica adotar uma metodologia estruturada ao rotacionar trabalhadores para não gerar um impacto negativo nos *outputs*, sejam bens ou serviços. Assim, Michalos, Makris e Chryssolouris (2013) investigaram o efeito da aplicação de rotação de postos de trabalho na qualidade do produto final durante operações de montagem, seguindo uma metodologia de cinco passos: 1) adoção de um modelo para correlacionar a probabilidade de erro humano com as características do produto, do operador e do sistema de montagem; 2) desenvolvimento de um modelo para representar o desempenho das linhas de montagem onde há intervenção humana; 3) definição de uma carga de trabalho típica a ser produzida pela linha de montagem; 4) avaliação da probabilidade de erro humano para cada tarefa dentro de um cenário com rotações e outro sem rotações; 5) comparação dos dois casos sob o escopo de possíveis defeitos de produtos e seu impacto sobre os operadores. Os autores descobriram que um plano eficiente de rotação de trabalho permitiu a redução do cansaço acumulado por operador, bem como a redução da monotonia devido à baixa diversidade de tarefas. A probabilidade de erro também foi reduzida acompanhada por uma distribuição eficaz da carga de trabalho entre os operadores.

Já em ambientes mais gerenciais, Sawhney (2013) concluiu que a rotação de postos de trabalho como medidas de treinamento para promover trabalhadores ou transferi-los a outros espaços setores incorporou flexibilidade nas operações e incrementou a produtividade dos trabalhadores, conseqüentemente melhorando o desempenho da empresa que a aplicava.

4.1. Rotação analisada através de procedimentos matemáticos

Sob o pressuposto que as rotações de postos de trabalho contribuem efetivamente na prevenção de LER/DORT, na flexibilização da mão-de-obra, no aumento da aprendizagem, na diminuição do tédio, etc. pesquisadores têm desenvolvido ferramentas quantitativas para a geração de programas de rotação visando atingir um ou mais objetivos, como os mencionados anteriormente. Tais procedimentos incluem modelos matemáticos, métodos heurísticos,

simulações, entre outras. Na presente subsecção é feita uma descrição das principais pesquisas que envolvem a geração de programas de rotação por meio desses procedimentos. As pesquisas são descritas em ordem cronológico, sendo que a maioria delas têm enfoques voltados à produtividade ou redução da exposição a riscos causantes de LER/DORT.

No ano 2000, Carnahan, Redfern e Norman parecem ser os pioneiros no desenvolvimento de procedimentos matemáticos para a geração de programas de rotação de postos de trabalho. Eles incorporaram critérios de ergonômicos no problema de *personnel scheduling*, para produzir programas de rotação de trabalho que reduzissem o potencial de lesão. A formulação básica de programação inteira serviu como base para o desenvolvimento de outros modelos de rotação com critérios ergonômicos. O problema pode ser modelado como segue:

Índices

- i Trabalhadores
- j Postos de trabalho
- t Períodos/Intervalos de rotação

Parâmetros

e_{ijt} Valor do risco ergonômico do trabalhador i no posto de trabalho j no período t .

No caso, esse parâmetro, além de variar de acordo com as capacidades do trabalhador, possui pontos ergonômicos dependentes do período (OTTO; SCHOLL, 2012). Em outras palavras, o parâmetro depende da duração dos intervalos de rotação (que para o caso pode ser heterogênea) ou da composição da operação em cada intervalo. Para exemplificar melhor as situações anteriormente descritas, suponha-se que em um turno de oito horas há quatro intervalos de rotação: o primeiro que dura quatro horas, o segundo que dura duas horas e os dois últimos que duram uma hora. Assim, o risco ergonômico do primeiro intervalo de rotação será diferente ao dos demais para todo trabalhador e para todo posto de trabalho. Agora suponha-se que os intervalos têm a mesma duração e é a tarefa que muda. Se, no primeiro intervalo de rotação em um posto de trabalho devem ser feitas tarefas de levantamento e no segundo atividades repetitivas, o risco ergonômico também varia a cada período. Cabe adicionar que é mais

frequente a utilização de parâmetros constantes com o tempo e a tarefa, ficando assim da forma e_j .

Variáveis de decisão

x_{ijt} 1 se o trabalhador i é alocado no posto de trabalho j no período t , 0 caso contrário.

E Máximo risco ergonômico entre todos os trabalhadores

$$\text{Minimizar } E \quad (1)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ijt} = 1 \quad \forall j \in \{1, \dots, n\}, t \in \{1, \dots, T\} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ijt} = 1 \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, t \in \{1, \dots, T\} \quad (3)$$

$$\sum_{t=1}^T \sum_{j=1}^n e_{ijt} x_{ijt} \leq E \quad \forall i \in \{1, \dots, n\}, t \in \{1, \dots, T\} \quad (4)$$

$$x_{ijt} \in \{0,1\}, E \in \mathbb{R}^+ \quad (5)$$

O objetivo (1) é minimizar o máximo risco ergonômico dentre todos os trabalhadores. A restrição (2) indica que para cada posto de trabalho em cada intervalo de rotação seja designado somente um trabalhador. Analogamente, a restrição (3) impõe que cada trabalhador em cada intervalo de rotação deve ocupar somente um posto de trabalho. A restrição (4) permite determinar os valores do risco ergonômico em cada intervalo de rotação e finalmente a restrição (5) estabelece o domínio das variáveis.

Além da programação inteira com versão determinística, os autores desenvolveram um algoritmo genético para criar múltiplos programas de rotação para efeitos comparativos. O algoritmo inicia gerando uma demanda de trabalho aleatória; depois efetua as alocações de trabalhadores a cargos dentro de um turno de trabalho; na terceira etapa é avaliada a qualidade da solução em uma escala de 0 a 1, onde 0 significa que o risco de desenvolvimento de lesão dentre todos os trabalhadores é baixo e 1 significa que o risco é muito alto; a quarta etapa consiste em misturar e/ou intercambiar alocações de trabalhadores a tarefas para produzir duas soluções “descendentes”; as etapas 3 e 4 se repetem até completar um número n de gerações. Ao final, os melhores programas de rotação, pontuados em 0,98 ou menos, foram escolhidos para compará-los com os programas gerados com o modelo. Os cargos a rotacionar estavam caracterizados por incluir tarefas de levantamento de objetos pesados, cujo potencial para causar lesão foi avaliada com o *Job Severity Index* (JSI). O algoritmo genético ofereceu um maior número de soluções aplicáveis em menos tempo, em comparação com o modelo de programação inteira.

Tharmmaphornphilas et al. (2003) desenvolveram programas de trabalho utilizando um modelo de programação linear para reduzir a probabilidade de perda auditiva dos trabalhadores que operavam na área de serraria em uma fábrica de armários. Ao rotacionar os trabalhadores através de diferentes postos durante o dia, foi possível reduzir sua exposição aos níveis de ruído perigosos. Simulações foram feitas com base em dados coletados no ambiente real. Os programas de trabalho empregados pela empresa foram comparados com os programas de trabalhos obtidas pelo modelo a partir das simulações. O programa de rotação gerado pelo modelo conseguiu reduzir significativamente a exposição ao ruído dos trabalhadores, sendo melhor que o plano de rotação da empresa.

Para Tharmmaphornphilas e Norman (2004), desenvolver um plano de rotação de trabalho “exige a definição do conjunto de tarefas a serem incluídas na rotação, a sequência de rotação, bem como a duração apropriada do intervalo de rotação”. Até aquela época, segundo os autores, nenhum trabalho havia sido realizado para determinar o comprimento mais apropriado de um intervalo de rotação que permitisse diminuir a exposição a riscos ergonômicos. Com essa motivação, os autores trabalharam com um modelo de programação inteira para tentar calcular tal comprimento, examinando e comparando os níveis de esforço dos trabalhadores ao serem submetidos a postos de trabalho que demandavam carga física por levantamento manual e

exposição ao ruído. O problema foi resolvido utilizando a ferramenta CPLEX. Depois de fazer uma análise estatística dos resultados, os autores concluíram que os intervalos de rotação com aproximadamente 2 horas de duração acumularam quase todos os possíveis benefícios que podem ser obtidos com rotação de trabalho, sendo que também representa um intervalo de rotação muito prático, pois é de fácil implementação em ambientes reais.

Seguidamente, no ano 2007 Tharmmaphornphilas e Norman utilizam dois indicadores para o desenvolvimento de um método robusto de rotação. O primeiro é o *Job Severity Index* (JSI) e o segundo o número de dias perdidos devido a lesões. Dois modelos de programação inteira e dois modelos não lineares inteiros foram formulados para minimizar o máximo JSI, o número máximo de dias de trabalho perdidos, e o número total de dias perdidos. Os autores utilizaram métodos heurísticos para dar solução aos problemas baseados na estrutura da modelagem. As heurísticas utilizadas foram o algoritmo guloso com procedimento de diversificação aleatória (GreedyRD) e o algoritmo guloso com procedimento de diversificação forçada (GreedyFD). Com ambas heurísticas foram obtidos resultados factíveis de aplicação em tempos computacionais aceitáveis.

Bhadury e Radovilsky (2006) desenvolveram ferramentas de uso gerencial para gerar programas de rotação de postos de trabalho visando minimizar os custos de alocação de trabalhadores e a monotonia por executar tarefas repetitivas. Três modelos matemáticos foram propostos: o primeiro de programação linear inteira para minimizar custos e o número máximo de repetições; o segundo, de programação não linear inteira para minimizar custos e o número máximo de repetições consecutivas; e o terceiro, um híbrido dos dois modelos. Para a geração dos programas de rotação, um algoritmo de tempo polinomial e duas heurísticas foram implementadas, baseadas na estrutura dos modelos matemáticos utilizando o MS Excel como plataforma.

Corominas, Pastor e Rodríguez (2006) abordaram o problema de rotacionar trabalhadores multifuncionais em uma empresa de serviços. O objetivo era que o tempo de permanência de cada trabalhador em um posto de trabalho estivesse suficientemente próximo a um valor central de referência, para assim manter os trabalhadores capacitados para executar todas as atividades e para que a carga de trabalho fosse mais equitativa. Considerações relacionadas às habilidades dos trabalhadores para realizar certos tipos de atividades foram incluídas dentro das restrições do modelo. Os autores propuseram um modelo de programação não-linear como forma de

representar o problema. No entanto, devido às limitações computacionais para resolvê-lo, os autores desenvolveram uma heurística a partir do algoritmo Jonker-Volgenant baseada na estrutura do modelo de programação não linear para gerar o programa de rotação. Experimentos computacionais foram feitos para testar a abordagem proposta, que apresentou resultados satisfatórios, pois os tempos de permanência de cada trabalhador em cada posto de trabalho estiveram próximos a um valor central e os tempos computacionais para obter a solução foram curtos.

Seçkiner e Kurt (2007) reformularam o modelo proposto por Carnahan, Redfern e Norman (2000) com o objetivo de minimizar o custo da carga de trabalho e levando em consideração a aptidão dos trabalhadores a tarefas. Os autores examinaram a efetividade da metaheurística *simulated annealing* para resolver instâncias de diferentes tamanhos para o problema proposto e compararam seu desempenho em qualidade de solução e tempos computacionais com o modelo de programação inteira. Similarmente, em 2008, os autores compararam o desempenho do modelo de programação, da metaheurística *simulated annealing* e do algoritmo de otimização da colônia de formigas para resolver o problema proposto em seu trabalho anterior. Duas formulações do algoritmo foram desenvolvidas com instâncias geradas aleatoriamente. Embora o modelo de programação inteira não tenha atingido o ótimo dentro do limite de tempo, em termos de qualidade obteve melhores soluções inteiras que os outros métodos.

Aryanezhad et al. (2009) desenvolveram um modelo de programação inteira para minimizar tanto exposição de trabalhadores ao ruído como diminuir o risco de desenvolver lesões lombares através de rotações de postos de trabalho. Os trabalhadores foram classificados segundo suas habilidades e os cargos segundo seus requisitos tanto ergonômicos como de habilidades. Como seu problema consistia em minimizar duas funções objetivo inconsistentes, os autores fizeram três formulações para resolvê-lo: duas onde cada função objetivo era minimizada em separado e outra onde a métrica LP foi utilizada para relacionar as duas funções objetivo. Os autores concluíram que é mais favorável solucionar o modelo levando em consideração os dois critérios em conjunto, pois não é conveniente comprometer um dos dois tipos de lesão.

Costa e Miralles (2009) desenvolveram uma heurística de decomposição baseada em um modelo matemático para gerar um programa de rotação de postos de trabalho operados por trabalhadores com deficiências. O objetivo para o primeiro subperíodo (intervalo) de rotação foi

minimizar o tempo de ciclo. Para os subperíodos seguintes o objetivo foi maximizar o número de tarefas executadas por cada trabalhador, respeitando restrições de tempos de ciclo para assim treiná-los e aumentar suas habilidades. Testes computacionais foram feitos com várias instâncias encontradas na literatura. Em relação à qualidade da solução, os autores afirmam que “é possível melhorar o bem-estar dos trabalhadores, aplicando rotação de postos de trabalho, sem perdas importantes de produtividade”. Em termos de tempo computacional, o método proposto comprovou ser rápido e eficaz, conseguindo atingir *gap* de até 0,18% em menos de 10 segundos.

Diego-Más et al. (2009) desenvolveram um algoritmo genético chamado DPI-ASEPEYO que permitia a qualquer planejador criar programas de rotação de postos de trabalho que considerem aspectos como os movimentos a executar em um cada posto e as capacidades gerais, mentais e de comunicação de cada trabalhador. O algoritmo também leva em conta as incapacidades temporais ou permanentes dos trabalhadores no momento de fazer as alocações. O objetivo foi obter a máxima diversificação das tarefas, tanto por questões ergonômicas como para aumentar a flexibilidade da linha em diferentes situações.

Azizi, Zolfaghari e Liang (2010) desenvolveram um modelo matemático de programação não linear para gerar programas de rotação em uma célula de manufatura, visando minimizar o atraso total na produção causado pela falta de habilidade dos trabalhadores e/ou motivação. Estes dois últimos componentes foram representados matematicamente em função de curvas de esquecimento e aprendizagem. Para solucionar o problema, desenvolveram um método heurístico chamado SAMED-JR, composto por um módulo de *simulated annealing*, um componente de algoritmo genético e um recurso de remoção de bloqueio de pontos mortos. Este recurso permite ao algoritmo aceitar a última solução factível examinada, independentemente se esta é pior do que a atual após n interações. A eficácia do método foi testada ao comparar suas soluções para o problema com as soluções fornecidas pelo algoritmo genético e o *simulated annealing*. O SAMED-JR demonstrou superioridade em qualidade de soluções e em tempos computacionais.

Michalos et al., (2010) desenvolveram uma ferramenta dinâmica para a geração de programas de rotação de postos de trabalho. Esta ferramenta funciona baseada em algoritmos de tomada de decisão de múltiplos critérios com enfoque hierárquico, que busca a minimização e maximização dos critérios que representam custos e benefícios respectivamente. Os critérios considerados foram: 1) competências, 2) acumulação de fadiga, 3) distância percorrida, 4) custo e 5) repetição

da tarefa. A ferramenta permite que a força de trabalho se adapte a variações nas demandas do mercado. Um estudo de caso foi aplicado em uma linha de montagem final de caminhões. Os resultados indicam que a ferramenta proposta pode ser utilizada para determinar uma boa solução para o problema de programação dos operadores, minimizando a acumulação de fadiga, incrementando a variação de tarefas, minimizando os custos de alocação, sendo que em alguns cenários os trabalhadores teriam que percorrer grandes distâncias. Em relação aos requisitos computacionais, estes representaram uma restrição pelo tamanho do problema e o número de instâncias.

Em 2011, Michalos Makris e Mourtzis desenvolveram uma ferramenta dinâmica que opera na web para gerar programas de rotação de postos de trabalho. Os mesmos critérios que os propostos em 2010 foram utilizados, adicionando mais dois: 1) a distribuição da fadiga entre os operários e 2) a distribuição de distância percorrida entre operários. A ferramenta incorpora um algoritmo de busca inteligente para a geração de soluções e permite representar uma linha de montagem, as tarefas a serem executadas para cada produto, e as características do operador.

Ayough Zandieh e Farsijani (2011) desenvolveram um modelo de programação não linear inteira para gerar um programa de rotação de postos de trabalho que minimizasse os custos de alocação de trabalhadores a postos de trabalho e os custos relacionados à monotonia de cumprir tarefas similares. Os autores solucionaram o problema com a utilização de dois métodos: o algoritmo genético e o algoritmo competitivo imperialista (ICA). Os resultados indicaram que para o problema em específico, o ICA teve um melhor desempenho quanto à qualidade da solução.

Asensio-Cuesta et al. (2012a) apresentaram um algoritmo genético para projetar programações de rotação que permitissem prevenir LER/DORT em postos de trabalho caracterizados por alta repetição de movimentos nas extremidades superiores. Fatores mecânicos, ambientais e organizacionais também foram levados em conta, da mesma forma que a assimetria dos movimentos em ambos os lados do corpo. Um estudo de caso foi conduzido em uma linha de montagem, na qual um programa de rotação foi gerado como alternativa temporária ao reprojeto de postos críticos. Nesse mesmo ano, Asensio-Cuesta et al. (2012b) projetaram programações de rotação utilizando critérios ergonômicos, de capacidade física e de competência dos trabalhadores para executar as tarefas. Com isto, os autores visaram minimizar o risco de desenvolvimento de

LER/DORT por acumulação de fadiga e maximizar o desempenho da produção. Um algoritmo genético, que os autores chamaram de *Ergonomic and Competent Rotation* (ECRot), foi utilizado para gerar os programas. O algoritmo gera de forma eficiente programas de rotação que permitem diversificar as tarefas executadas pelos trabalhadores e limitando as repetições corporais, considerando a aptidão de cada trabalhador em cada posto de trabalho.

Otto e Scholl (2013) demonstraram que a complexidade de seu problema de rotação de postos de trabalho com critérios ergonômicos é de caráter *NP-Hard*. Porém, propuseram uma heurística de suavização para este, visando balancear os riscos aos que todos os trabalhadores estão expostos. Esta heurística foi utilizada para gerar soluções iniciais e como procedimento de re-otimização, e pode ser integrada com outros procedimentos heurísticos. A heurística proposta foi comparada com outras técnicas, como busca tabu, o otimizador FICO Xpress, e a heurística com procedimento de diversificação aleatória (GRD). Uma análise estatística foi feita para comparar o desempenho dos métodos, sendo que as soluções geradas pelo algoritmo de busca tabu proposto para o problema foram de maior qualidade, muito próximas ao ótimo. No entanto, a heurística de suavização provou ser muito mais rápida, gerando soluções de qualidade aceitável de forma quase imediata.

Azizi e Liang (2013) utilizaram uma heurística construtiva baseada em um modelo de programação não linear inteira mista para abordar o problema de alocação de mão de obra, rotação de postos de trabalho e treinamento em uma célula de manufatura. O objetivo foi a minimização dos custos de treinamento, custos de flexibilidade de mão de obra e custos de perda de produtividade. Os pesquisadores incluíram no modelo aspectos relacionados à variabilidade das habilidades dos trabalhadores e suas multifuncionalidades, formuladas em termos de curvas de aprendizagem e esquecimento. Foram estudadas várias instâncias de diferentes tamanhos, e para todas, o algoritmo apresentou bons resultados em tempos computacionais aceitáveis. Como resultado, verificou-se que quanto mais curto o intervalo de rotação, maiores serão os custos totais.

Moreira e Costa (2013) propuseram um método de solução para o problema de geração de programas de rotação em centros onde operam trabalhadores deficientes. Os dois objetivos principais foram a maximização do número de tarefas que cada trabalhador executa e a minimização do tempo de ciclo, isso levando em consideração as diferenças entre os

trabalhadores. Os autores desenvolveram um algoritmo híbrido composto por quatro métodos heurísticos (heurística construtiva, algoritmo genético híbrido, busca tabu e GRASP), e modelos de programação inteira mista para a geração de soluções iniciais e como método de melhoria pós otimização. Os resultados da heurística foram comparados com os obtidos pelo algoritmo de decomposição proposto por Costa e Miralles (2009), utilizando instâncias disponíveis na literatura. A heurística desenvolvida pelos autores conseguiu resolver instâncias de tamanho médio e grande, algo que a heurística de decomposição não conseguiu, chegando a soluções perto do ótimo em tempos computacionais aceitáveis que oscilam entre os 33 e 2.000 segundos dependendo da instância.

Uma solução a um problema de distribuição de carga de trabalho entre grupos de trabalhadores em uma empresa produtora de calçados foi apresentada por Anzanello, Fogliatto e Santos (2014). Os autores integraram métodos de cálculo de curvas de aprendizagem e ferramentas de *scheduling* para calcular os tempos de processamento de pedidos e distribuir a carga de trabalho equitativamente. Para determinar a sequência de trabalho, levaram em consideração critérios ergonômicos para minimizar o atraso total ponderado. Os autores compararam os resultados ao fazer tais distribuições incluindo e excluindo os critérios ergonômicos, sendo que o desempenho da produção em ambos os casos foi relativamente similar. Simulações foram feitas para testar a robustez do método proposto variando os parâmetros de número de lotes, tamanho de lotes e datas de entrega. Os resultados apontaram que a inclusão de critérios ergonômicos permite reduzir a carga de trabalho, no entanto, o atraso total da produção é ligeiramente maior ao inclui-los, mas tal diferença é compensada em termos da saúde dos trabalhadores.

O trabalho mais recente sobre geração de postos de trabalho é bastante similar à proposta da presente pesquisa. Nele, Boenzi et al., (2015) desenvolveram um modelo de programação não linear inteira mista com o objetivo de maximizar as unidades produzidas em todos os postos de trabalho por todos os trabalhadores, ao longo do horizonte de planejamento. Aspectos como o desempenho dos trabalhadores e suas habilidades foram levadas em consideração. Uma restrição que limita a exposição a riscos é incorporada através da utilização do índice OCRA. O modelo foi aplicado em uma empresa italiana de montagem de assentos de carros. Testes foram feitos variando o máximo valor do índice OCRA permitido. Os resultados demonstraram que quando o

índice OCRA diminuía em grande escala, caía o número de unidades produzidas. Cabe remarcar que a abordagem demonstra a viabilidade de balancear riscos ergonômicos e produtividade.

Na literatura é possível observar uma lacuna na implementação de métodos precisos para determinar as rotações mais adequadas de postos de trabalho. Embora tenham sido propostos vários estudos, poucos têm considerado LER/DORT e são ainda mais escassas as pesquisas baseadas na medição da carga postural em conjunto com a produtividade. Este trabalho aborda precisamente esses fatores.

Na tabela 4.1.1. encontra-se um resumo dos principais trabalhos que abordam a rotação de postos de trabalho através do uso de abordagens matemáticas, havendo procedimento matemático para a geração do programa ou esquema de rotação, abordando diversos objetivos e critérios relacionados às características humanas.

Tabela 4.1.1. Principais pesquisas de rotação de postos de trabalho a partir de abordagens matemáticas. Fonte: Elaboração própria.

AUTOR(ES)	CRITÉRIO PARA EXECUTAR A ROTAÇÃO		FATOR DE EXPOSIÇÃO		OBJETIVO	TECNICA DE SOLUÇÃO
	Alocação muda ao finalizar período	Alocação muda ao finalizar tarefa	Habilidades individuais	Risco ergonômico		
Carnahan, Redfern e Norman (2000)	X			X	Único	PI, AG
Thammaphorphilas et al. (2003)	X			X	Único	PI
Thammaphorphilas e Norman (2004)	X			X	Único	PI
Bhadury e Radovilsky (2006)	X			X	Único	PI, PNLIM, heurísticas desenvolvidas pelo autor
Corominas, Pastor e Rodriguez (2006)	X		X		Único	Heurística baseada no algoritmo Jonker-Volgenant
Thammaphorphilas e Norman (2007)	X			X	Múltiplo	GR
Seçkiner e Kurt (2007)	X		-	-	Único	PI, AS
Seçkiner e Kurt (2008)	X		-	-	Único	PI, SA, CF
Aryanezhad et al. (2009)	X		X	X	Múltiplo	PI
Costa e Miralles (2009)	X	X		X	Múltiplo	PLIM, MD
Diego-Más et al. (2009)	X		X	X	Único	AG
Azizi, Zolfaghari e Liang (2010)	X		X		Único	HH: AG – AS

	X	X	X	X	X	X	X	Múltiplo	Algoritmos de tomada de decisão
Michalos et al. (2010)	X							Múltiplo	Algoritmo de busca inteligente
Michalos Makris e Mourtzis (2011)	X	X						Múltiplo	PNLIM
Ayough, Zandieh e Farsijani (2011)	X							Único	AG
Asensio-Cuesta et al. (2012a)	X							Único	AG
Asensio-Cuesta et al. (2012b)	X				X			Múltiplo	AG
Otto e Scholl (2013)	X							Único	HS, BT, FX, GR
Azizi e Liang (2013)	X						X	Único	HC.
Moreira e Costa (2013)	X				X			Múltiplo	PLIM, HH.
Anzanello, Fogliatto e Santos (2014)	X				X		X	Múltiplo	Abordagem com múltiplas fases.
Boenzi et al., (2015)	X				X		X	Único	PNLIM.

Siglas: 1) **PI.** Programação inteira; 2) **PLIM.** Programação linear inteira mista; 3) **PNLIM.** Programação não linear inteira mista; 4) **AG.** Algoritmo genético; 5) **SA.** *Simulated Annealing*; 6) **CF.** Colônia de formigas; 7) **HH.** Heurística híbrida; 8) **BT.** Busca tabu; 9) **FX.** FICO Xpress; 10) **HS.** Heurística de suavização; 11) **MD.** Método de decomposição heurística; 12) **HC.** Heurística construtiva; 13) **GR.** Algoritmo guloso.

5. ABORDAGEM PROPOSTA

Na seguinte seção é apresentada uma descrição da abordagem proposta para dar solução ao problema de alocação de trabalhadores considerando critérios ergonômicos e de produtividade. Na subseção 5.1 é exposto o modelo matemático desenvolvido para representar o problema; na subseção 5.2 é descrita a simulação computacional desenvolvida; finalmente, na subseção 5.3 é descrita a metodologia de integração da modelagem matemática e da simulação computacional.

5.1. Modelagem matemática

O presente problema encontra-se na classe de problemas de otimização combinatória, pois pretende-se encontrar a melhor solução a partir de um conjunto finito de elementos (KLEE, 1980). Dentro dos problemas de otimização combinatória, encontra-se na subcategoria de *Personnel Scheduling*, especificamente do tipo *Timetabling and Sequencing* (Problemas de programação de horários e sequenciamento de pessoal). O objetivo neste caso é definir a melhor sequência de tarefas para cada trabalhador, indicando o momento em que terão lugar as alocações de trabalhadores a postos de trabalho dentro de um horizonte de planejamento, minimizando (ou maximizando) uma função objetivo (WREN, 1996).

Baker, (1976) classificou os problemas de *Personnel Scheduling* em três grupos: problemas de agendamento de horários, problemas de agendamento de dias de folga e agendamento tour, um híbrido dos anteriores. O problema estudado pode ser incluído dentro do primeiro grupo da classificação, onde as atividades que cada trabalhador desenvolverá em seu turno de trabalho devem ser agendadas diariamente, o que é um problema característico de empresas manufatureiras

A Figura 5.1 é uma representação para o problema estudado. Para dar solução ao problema é necessário alocar trabalhadores (representados pela letra i na figura) a postos de trabalho (representados por j) durante cada intervalo de rotação (representados por t). Tome-se como exemplo o trabalhador 1: durante o primeiro intervalo de rotação ele pode ser alocado nos postos de trabalho 1 ou 2, no segundo intervalo pode ser alocado no posto 3, no terceiro intervalo nos postos 1 ou 3 e no último intervalo pode ser designado nos locais 2 ou 3.

Simultaneamente, é determinada a melhor sequência de trabalho para cada trabalhador ao longo dos intervalos de rotação, onde o trade-off entre o indicador de risco ergonômico e a produtividade seja o ideal. Como observado novamente na Figura 5.1, a melhor sequência de trabalho para o trabalhador 1 dentre todas as combinações possíveis corresponde a ocupar o posto de trabalho 1 no primeiro intervalo de rotação, o posto de trabalho j no segundo intervalo de rotação, o posto 3 no terceiro intervalo e assim por diante até finalmente o posto de trabalho 3 ao final do horizonte de planejamento.

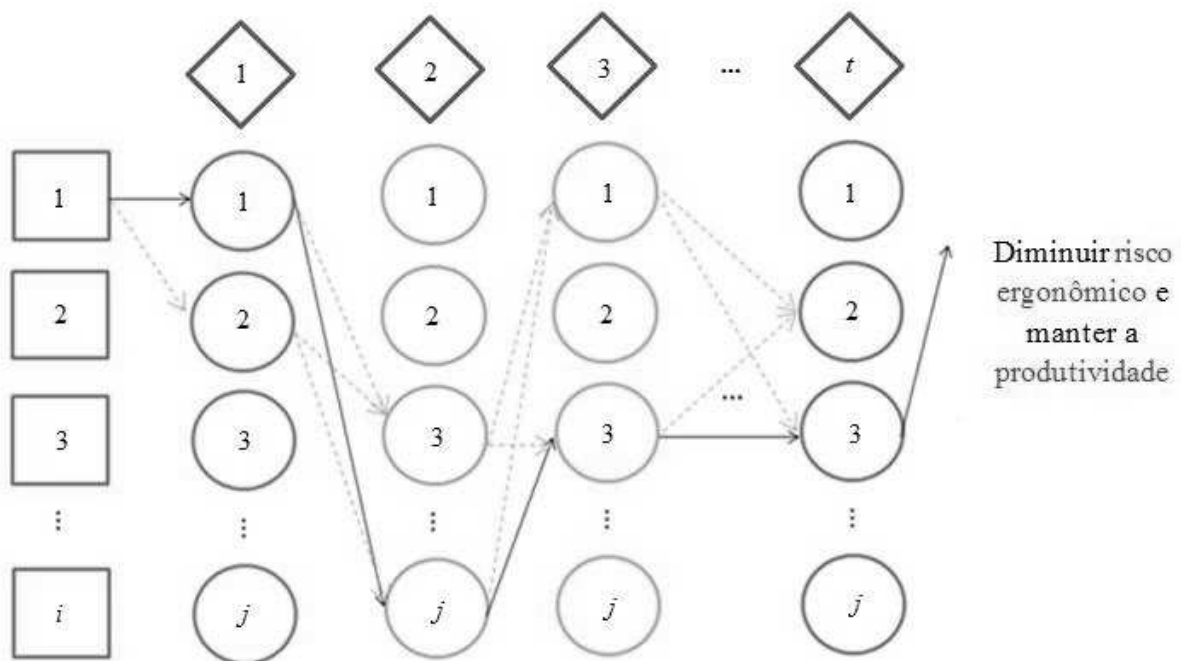


Figura 5.1. Descrição do problema de programação de horários e sequenciamento. Fonte:

Elaboração própria

No caso estudado, as tarefas são de caráter repetitivo, sendo também necessário evitar que os trabalhadores esforcem de forma contínua os mesmos grupos musculares ao rotacionar, respeitando as restrições de produtividade.

Para avaliar os esforços associados aos trabalhos repetitivos de cada posto de trabalho é usado o índice *Occupational Repetitive Action* (OCRA). O OCRA associado a cada posto de

trabalho leva em consideração o tempo de permanência de cada trabalhador nele (isso é, a duração do intervalo de rotação). Este indicador é calculado utilizando a equação formulada na seção 2.2.1.3. Neste problema é assumido que não existem riscos ergonômicos individuais, ou seja, o valor do índice OCRA será igual para todos os trabalhadores (OTTO; SCHOLL, 2012).

Dado que com o método OCRA só é obtido um valor para estimar o risco ergonômico no corpo inteiro, o método de avaliação ergonômica proposto por Sue Rodgers (descrito na seção 2.2.1.4.) é utilizado para estimar e controlar os esforços contínuos que cada trabalhador executa em segmentos separados do corpo, a saber: 1) costas, 2) ombros, 3) braços e joelhos, 4) punho, mão e dedos e 5) membros inferiores. Com a incorporação deste método busca-se evitar que os trabalhadores continuem executando tarefas que envolvam alto risco para os mesmos segmentos corporais e assim aumentar a diversidade das tarefas.

Para a modelagem consideram-se tarefas de alto risco aquelas que envolvem grande demanda mecânica dos membros anteriormente mencionados, ou seja, que atingem uma pontuação de criticidade igual a 3, segundo o método Sue Rodgers. As tarefas com pontuação igual a 4 não são levadas em consideração, já que no caso estudado os postos com esta característica são inexistentes.

Finalmente, para assegurar que os níveis de produtividade sejam mantidos, a taxa de produção de cada trabalhador durante seu tempo de permanência em cada posto é incluída na modelagem. Esta taxa de produção corresponde ao número de unidades que cada trabalhador produz em média sob condições ideais (trabalho contínuo sem interrupções).

Para efetuar a modelagem foi necessário estabelecer alguns pressupostos, os quais são descritos a seguir:

- ✓ Neste modelo a alocação de trabalhadores a postos de trabalho é balanceada (AYOUGH; ZANDIEH; FARSIJANI, 2011), ou seja, o número de trabalhadores é igual ao número de postos de trabalho disponíveis para serem ocupados durante o turno de trabalho.
- ✓ Todos os trabalhadores são polivalentes, ou seja, são capazes de ocupar todos os cargos e executar todas as tarefas. No entanto, eles também possuem capacidades produtivas heterogêneas, o que implica que alguns são mais produtivos em certos postos do que em outros.

- ✓ Dada a evidência que sugere que a duração dos intervalos de rotação deve ser de duas horas ou menos para garantir a diminuição de exposição a riscos ergonômicos físicos [(THARMMAPHORNPHILAS; NORMAN, 2004), (FILUS; OKIMORTO, 2012)], na presente pesquisa a duração dos intervalos de rotação representa um parâmetro discreto de duas horas de duração.
- ✓ Considera-se que os postos de trabalho são independentes, ou seja, não há relação de precedência entre os postos de trabalho.
- ✓ Cada posto de trabalho pertence a uma única linha de embalagem, e existe uma demanda previamente conhecida de produtos em cada linha.
- ✓ Mesmo que na literatura seja considerado que os riscos ergonômicos de dias consecutivos são independentes (OTTO; SCHOLL, 2012), para o desenvolvimento deste programa de rotação considera-se os riscos de um dia como valores de entrada do dia seguinte, para assim balancear o índice associado ao risco ergonômico e aumentar a variedade de tarefas. Desta forma, o número total de intervalos de rotação para o programa será igual ao número de intervalos de rotação por dia vezes o número total de dias no horizonte de planejamento. Assim, os intervalos de rotação que vão do 1 até o 4 correspondem ao dia 1, os intervalos de rotação do 5 até o 8 correspondem ao dia 2 e assim por diante.
- ✓ Não são consideradas restrições de recursos (matéria prima, insumos, etc.) a serem transformados na produção, uma vez que todas as tarefas devem ser executadas no horizonte de planejamento.
- ✓ O absenteísmo de trabalhadores também é desconsiderado na modelagem matemática.

A formulação matemática da presente pesquisa corresponde a um modelo de programação linear inteira mista, baseada na modelagem proposta por Carnahan, Redfern e Norman (2000), descrita na seção 3.4. Esta formulação diferencia-se da apresentada por Carnahan, Redfern e Norman (2000), pois além da consideração de riscos ergonômicos globais avaliados na função objetivo, a produtividade de cada trabalhador é incorporada. Também, diferencia-se da proposta de Boenzi et al., (2015), cujo modelo de programação não linear inteira mista tenta maximizar o número de unidades produzidas ao tempo que restringe um único índice ergonômico. Boenzi et al., (2015) também estabelecem uma relação direta entre o número de repetições feitas por cada

trabalhador e o índice OCRA através de uma restrição, algo que não é feito na presente modelagem.

Na seguinte subseção será explicado o modelo proposto junto com a notação utilizada para descrevê-lo. O objetivo é minimizar o máximo valor do OCRA de todos os trabalhadores ao final do horizonte de planejamento, respeitando as restrições de produtividade. Também são incluídas restrições para evitar que os trabalhadores continuem sobre esforçando os mesmos grupos musculares entre intervalos de rotação consecutivos.

Índices

i	Índice dos trabalhadores
j, k	Índice dos postos de trabalho
t	Índice dos intervalos de rotação
m	Índice de grupos musculares
l	Linha de produção

Parâmetros

I	Número de trabalhadores
J	Número de postos de trabalho
T	Número de intervalos de rotação no horizonte de planejamento
M	Número de grupos musculares: 1) costas, 2) ombros, 3) braços e joelhos, 4) punho, mão e dedos, 5) membros inferiores.
L	Número de linhas de produção
e_j	Valor do índice OCRA no posto de trabalho j durante um intervalo de rotação.

- Q_{ij} Unidades produzidas pelo trabalhador i no posto de trabalho j durante um intervalo de rotação sob condições ideais (este valor é uma média).
- U_{jm} Parâmetro binário igual a 1 se no posto de trabalho j é exercitado grupo muscular m de forma crítica segundo o método Sue Rodgers. 0 caso contrário.
- P_l Número de unidades mínimas que devem ser produzidas na linha de produção l ao final do horizonte de planejamento.
- N Número de vezes que é permitido que um trabalhador continuasse exercitando um grupo muscular de forma crítica segundo o método Sue Rodgers.
- W Limitante suficientemente grande.

Conjuntos

- J'_l Conjunto de postos de trabalho que pertencem à linha l .

Variáveis de decisão

- X_{ijt} 1 se o trabalhador i for alocado posto de trabalho j no intervalo de rotação t ; 0 caso contrário.

Variáveis auxiliares

- Z_{itm} 1 se o trabalhador i no intervalo de rotação t continua exercitando um grupo muscular m forma crítica segundo o método Sue Rodgers. 0 caso contrário.
- E_{max} Máximo valor do OCRA alcançado dentre todos os trabalhadores.

$$\text{Minimizar} \quad \text{Emax} \quad (5.1)$$

Sujeito a:

$$\text{Emax} \geq \sum_j \sum_t e_j X_{ijt} \quad \forall i \quad (5.2)$$

$$\sum_j X_{ijt} = 1 \quad \forall i, t \quad (5.3)$$

$$\sum_i X_{ijt} = 1 \quad \forall j, t \quad (5.4)$$

$$\sum_i \sum_{j \in J'_l} \sum_t Q_{ij} X_{ijt} \geq P_l \quad \forall l \quad (5.5)$$

$$Z_{itm} \geq \sum_j U_{jm} X_{ijt} + \sum_k U_{km} X_{ik(t-1)} - 1 \quad \forall i, t, m \quad (5.6)$$

$$\sum_t \sum_m Z_{itm} \leq N \quad \forall i \quad (5.7)$$

$$\begin{aligned} & \text{Emax} \in \mathbb{R}^+; \quad Y_{ijt} \in \mathbb{Z}^+; \quad Z_{itm} \in \{0,1\}; \quad X_{ijt} \in \{0,1\} \\ & \forall i = 1, \dots, I; \quad j, k = 1, \dots, J; \quad t = 1, \dots, t; \quad m = 1, \dots, M, L = 1, \dots, L \end{aligned} \quad (5.8)$$

A função objetivo (5.1) visa minimizar o máximo valor do índice OCRA atingido, considerando todos os trabalhadores ao final do horizonte de planejamento. Assim, tenta-se balancear o risco ergonômico associado com repetitividade, frequência e esforços realizados.

Com a inequação (5.2) é possível calcular qual o maior valor do índice OCRA alcançado por todos os trabalhadores através de todas as alocações feitas a postos de trabalho nos intervalos de rotação.

As restrições (5.3) e (5.4) garantem a associação dos trabalhadores aos postos de trabalho. De fato, a restrição (5.3) designa a cada trabalhador somente um posto de trabalho em cada intervalo de rotação, enquanto que a restrição (5.4) assegura que em cada posto de trabalho seja alocado unicamente um trabalhador em cada intervalo de rotação. Estas formulações evitam que fiquem postos de trabalho sem serem ocupados, trabalhadores sem serem alocados, trabalhadores alocados a mais de um posto de trabalho e/ou postos de trabalho com mais de um trabalhador alocado em cada intervalo de rotação.

A formulação (5.5) está relacionada à alocação de trabalhadores produtivos aos postos de trabalho e a qual deve ser o limite das unidades processadas em cada linha de produção. Esta restrição indica que em cada linha, o número de unidades processadas por todos os trabalhadores ali alocados através do horizonte de planejamento devem ser maiores ou iguais às unidades mínimas requeridas, previamente estabelecidas.

A restrição (5.6) funciona como contador, já que permite à variável Z_{itm} tomar o valor de 1 quando um trabalhador continua exercitando de forma crítica um segmento corporal segundo o método Sue Rodgers na troca de dois intervalos de rotação consecutivos.

A restrição (5.7) limita o número de vezes que é permitido que um trabalhador continue esforçando os grupos musculares de forma crítica (segundo o método Sue Rodgers). Para ilustrar melhor o funcionamento desta restrição, assume-se que o valor de N é 1. O modelo então permitirá a cada trabalhador passar de um posto de trabalho com criticidade alta em um grupo muscular m a outro posto igualmente crítico para o mesmo grupo muscular no máximo uma vez em todo o horizonte de planejamento e somente para esse grupo muscular. Para o caso estudado, o valor de N foi fixado em zero (0), ou seja, não é permitido que os trabalhadores continuem sobre esforçando os segmentos corporais anteriormente mencionados.

Finalmente, as expressões descritas (5.8) delimitam o domínio das variáveis e a conformação dos conjuntos de índices.

5.2. Simulação computacional

Segundo Kaizer, Heller e Oberkampff (2015) a simulação computacional “é a imitação do comportamento de um sistema, entidade, fenômeno ou processo no universo físico utilizando conceitos matemáticos limitados, símbolos e relações”. Segundo estes autores, os objetivos deste tipo de representações podem ser de ordem prática (apoio à decisão) ou científica (entendimento do universo físico). Também é sempre necessário verificar a confiabilidade dos resultados antes de tomar uma decisão ou emitir um conceito (OBERKAMPFF; ROY, 2010).

Existem múltiplas categorizações para os modelos de simulação computacional, no entanto, três dimensões parecem ser bastante úteis (KELTON; SADOWSKI; SADOWSKI, 2003):

- **Dinâmico ou estático:** Se o modelo muda, ou não, com o tempo
- **Contínuo ou discreto:** Se o estado do sistema muda continuamente ao longo do tempo ou se muda em pontos destacados do tempo.
- **Estocástico ou determinístico:** Se os componentes do modelo operam de forma aleatória ou não.

Em geral, as simulações computacionais podem ter elementos mistos das características anteriormente mencionadas, ou seja, é possível que um modelo de simulação possa ter componentes contínuos e discretos ao mesmo tempo, da mesma forma que modelos podem apresentar simultaneamente elementos estocásticos e determinísticos.

A simulação computacional tem sido utilizada como ferramenta de apoio para solucionar problemas de *Personnel Scheduling*, por exemplo, no planejamento de turnos de trabalho, esquemas de dias livres e de turnos de trabalho com dias livres (ALFARES, 2007). Foi identificado que a simulação computacional tem sido utilizada de forma conjunta com otimização e métodos heurísticos para diversos fins. Alguns autores a utilizaram com o propósito de prever a necessidade mão de obra, para eventualmente gerar turnos de trabalho via otimização ou aproximação heurística com base nos resultados da simulação [(ATLASON; EPELMAN, 2004), (CEZIK; L'ECUYER, 2007), (ERTOGRAL; BAMUQABEL, 2008)]. Em outras pesquisas, a técnica tem sido utilizada para validar a robustez dos resultados obtidos com modelos de otimização ou com métodos heurísticos sob condições de alta variabilidade [(KABAK et al.,

2008), (L. DE GRANO; MEDEIROS; EITEL, 2008), (AVRAMIDIS; CHAN; L'ECUYER, 2009), (DÜCK et al., 2012)].

Para a presente pesquisa, a simulação é utilizada para conferir se o esquema de rotação de postos de trabalho gerado pela resolução do modelo matemático cumpre com os requerimentos de produtividade por interrupções de diversas origens (como acidentes, falta de material ou limpeza) e pela variabilidade das taxas de produção, entre outros. A integração da modelagem matemática e do modelo de simulação será explicada em detalhe na seção 6.

5.2.1. Simulação computacional do problema estudado

A figura 5.2 ilustra o modelo computacional construído para os oito postos de trabalho. Os componentes da simulação serão descritos na sequência.

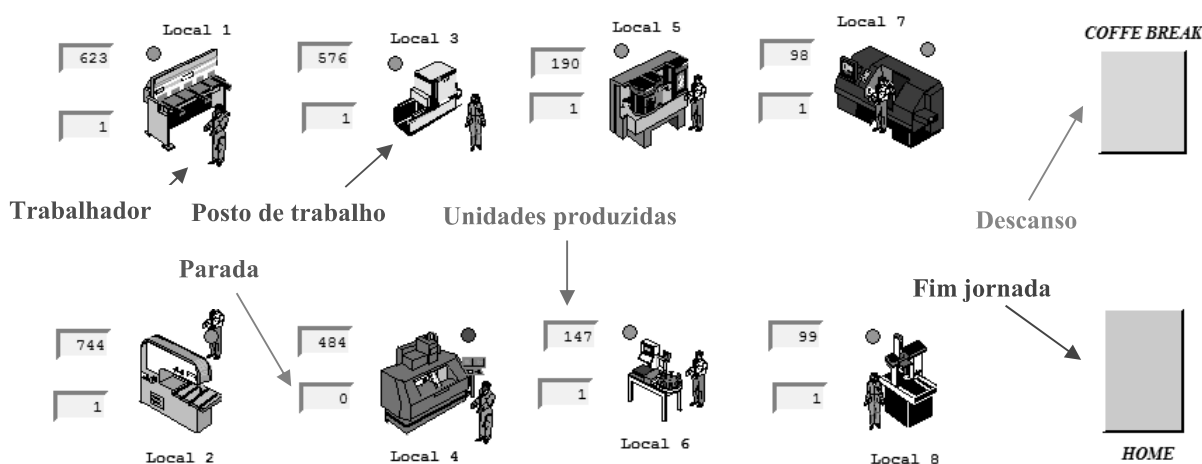


Figura 5.2. Simulação computacional do caso estudado. Fonte: Elaboração própria.

- **Condições de início e término:** A simulação computacional foi programada para uma jornada laboral útil de uma semana. Para o caso, a jornada laboral é de segunda a sexta-feira, começando às 08:00 hrs até as 17:05 hrs, com uma pausa de almoço entre as 12:00 e 13:00 hrs. Para calcular o número de replicações semanais de cada cenário estudado, utilizou-se a ferramenta StatFit. Como observado na figura 5.3, o nível de confiança foi de 95% e os critérios de avaliação foram o desvio padrão e a diferença entre os valores mínimo e máximo encontrados para as produções por posto de trabalho. Em geral, foi

encontrado que os resultados são estatisticamente representativos ao executar entre 4 e 6 replicações, pelo qual foi decidido executar 6 replicações de cada cenário.

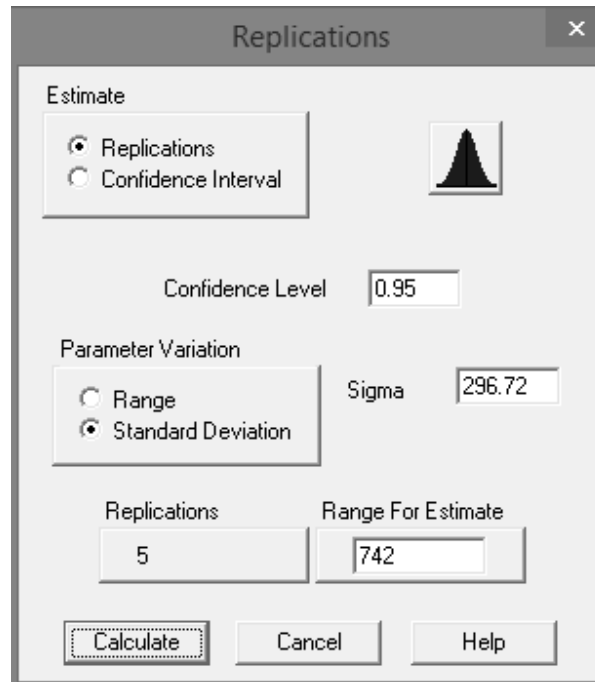


Figura 5.3. Cálculo do número de replicações. Fonte: StatFit versão 2.2.0.13 ProModel Textbook.

- **Postos de trabalho:** Os postos de trabalho da simulação estão projetados como locais, postos fixos onde chegam os trabalhadores ao receber uma ordem de trabalho. Os postos de trabalho 1, 2, 3 e 4 pertencem à linha 1, os postos 5 e 6 à linha 2, e os 7 e 8 à linha 3.
- **Trabalhadores:** Os trabalhadores estão representados como recursos que desempenham operações no local onde são chamados. Cada um deles tem uma taxa de produtividade diferente em cada posto de trabalho, a qual se deriva de uma distribuição de probabilidade ajustada para incorporar variabilidade.
- **Ordens de trabalho:** As ordens de trabalho são a sequência de trabalho que cada trabalhador deve seguir ao longo do horizonte de planejamento, em outras palavras, são o programa de rotação gerado pelo modelo matemático. Na simulação, as ordens de trabalho são consideradas entidades que são enviadas aos locais correspondentes a cada

duas horas ou a cada término de função são enviadas ao próximo posto de trabalho, numa sequencia que obedece às regras vindas do modelo de otimização

- **Paradas:** As paradas representam as interrupções que acontecem durante a jornada de trabalho, sendo que podem ter diversas causas, desde acidentes, limpeza e organização, manutenção até ausência de materiais. O conjunto de todas as paradas para cada posto de trabalho é definido através de uma simulação de Monte Carlo, onde são sorteadas quais paradas ocorrerão. Cada tipo de parada tem um tempo de duração estocástico, e o número de paradas por dia em cada posto de trabalho é dado em termos de uma distribuição de probabilidade discreta. Já o tempo entre paradas também segue uma distribuição de probabilidade para cada posto de trabalho. As paradas são monitoradas como variáveis, para controlar o número de vezes que ocorrem durante a simulação.
- **Unidades produzidas:** As unidades produzidas em cada posto de trabalho ao final do horizonte de planejamento são examinadas como variáveis. Estes dados são guardados ao final de cada corrida de simulação e constituem a informação mais relevante fornecida pelo modelo, pois com base nestas quantidades vai ser definido se um determinado programa de rotação satisfaz com as necessidades de produção ou não, levando em conta a variabilidade do sistema real.

5.3. Integração dos métodos de otimização e simulação

A integração dos métodos é ilustrada na figura 5.4.

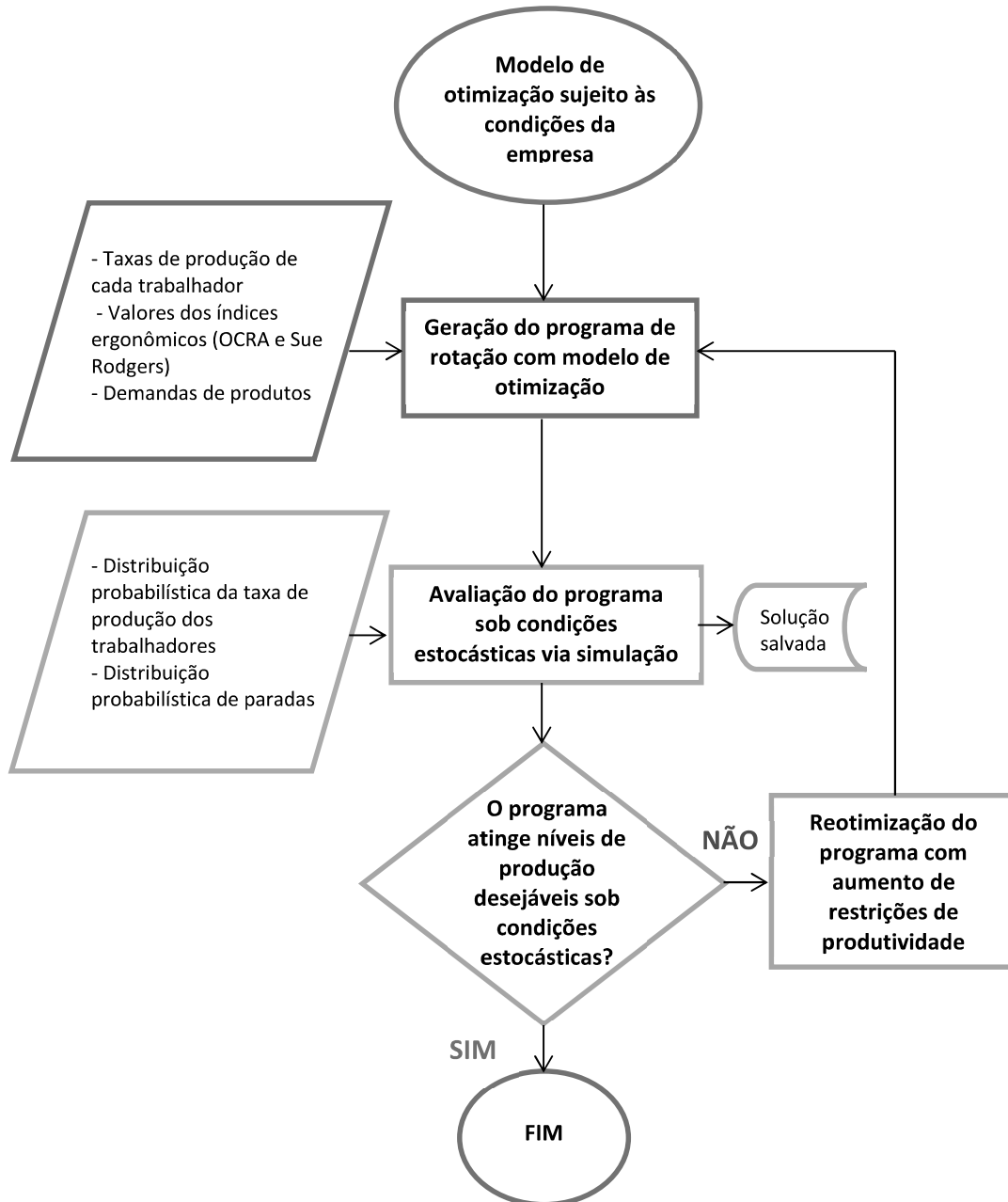


Figura 5.4. Integração do modelo matemático e simulação computacional. Fonte: Elaboração própria.

O procedimento inicia com o desenvolvimento do modelo matemático genérico, capaz de ser adaptado às condições da empresa. Na sequência, o modelo é resolvido, utilizando como parâmetros os dados fornecidos pela empresa: os valores dos índices OCRA e Sue Rodgers em cada posto de trabalho; as taxas de produção dos trabalhadores, expressas em número de unidades produzidas em média durante um intervalo de rotação e finalmente; as demandas de produtos por linha ao final do horizonte de planejamento, lembrando que cada posto de trabalho pertence a uma linha.

Depois, o programa de rotação gerado pela resolução do modelo é avaliado sob condições de variabilidade via simulação. O objetivo é determinar se com a implementação do programa são atingidos os níveis de produtividade esperados pela empresa ao existirem interrupções de diversas origens, as quais têm sido identificadas como obstáculos. Os níveis de produtividade são expressos em unidades produzidas, onde há a necessidade de uma produção mínima no período de uma semana de trabalho (cinco dias). Uma vez terminada a simulação, a solução gerada é salva para efeitos comparativos.

Se ao avaliar o programa de rotação (gerado pelo modelo de otimização) através da simulação computacional, não se consegue alcançar os níveis de produtividade, então é feito um ajuste nas restrições de produtividade do modelo de otimização da seguinte forma:

Sejam $\sum_{j \in L} x_j \geq P_l$ o conjunto de restrições de produtividade no modelo que não foram satisfeitas via simulação, onde x_j representa a quantidade total produzida em cada posto e P_l o parâmetro de produtividade por linha. Seja ΔP_l a diferença percentual entre os valores de produtividade atingidos pela simulação e os valores desejáveis. Então, a restrição relacionada à produtividade com maior diferença entre o valor desejado e o valor obtido é reformulada da forma $\sum_{j \in L} x_j \geq P'_l$ onde $P'_l = P_l \times (1 + \Delta P_l)$.

Uma vez ajustada a restrição, o modelo é reotimizado e re-avaliado via simulação. O processo finaliza quando os níveis de produtividade em condições estocásticas são alcançados. Caso aconteça algum tipo de infactibilidade ao ajustar a restrição de forma percentual, é procedido a ajustá-la de forma gradual, com incrementos pequenos. Adicionalmente, será analisado até que ponto é possível continuar reajustando as restrições.

Cabe mencionar que também são gerados e avaliados dois programas adicionais para fins comparativos: um eliminando restrições de produtividade e outro eliminando restrições dos índices ergonômicos, sujeito ao esquema de rotação da empresa.

6. AVALIAÇÃO DA METODOLOGIA PROPOSTA

No presente capítulo são apresentados os resultados da avaliação da metodologia proposta, sendo aplicada a uma situação real em uma empresa do setor industrial. Os dados utilizados nesta etapa foram fornecidos pela empresa. Na tabela 6.1 estão os dados correspondentes às unidades esperadas em cada linha via modelagem e via simulação (colunas 2 e 3 respectivamente), o valor do índice OCRA em cada posto de trabalho durante um intervalo de rotação (coluna 5) e o valor total do índice OCRA de cada posto de trabalho (coluna 6). Observa-se que os valores das unidades esperadas na modelagem e na simulação são diferentes. Isso, pois os dados de produtividade dos trabalhadores para o modelo matemático estão sujeitos a condições ideais (sem paradas e sem variações na produtividade), entretanto, os valores para fins de verificação da simulação estão sujeitos à realidade (contemplando interrupções e taxas de produtividade dadas em termos probabilísticos). Assim, os valores de verificação de produtividade (unidades esperadas) na simulação são menores do que os valores de verificação na modelagem (P_l). Na modelagem, utilizou-se o número médio de unidades que os trabalhadores conseguem produzir em cada linha ao final do horizonte de planejamento sob condições ideais como parâmetro de demanda de unidades produzidas. Já na simulação foi utilizado o número médio de unidades que são processadas anualmente no CD. Na tabela 6.2 estão as informações sobre a criticidade dos postos de trabalho para cada um dos membros avaliados a partir da ótica do método Sue Rodgers. Pode ser observado que somente dois postos (5 e 6) possuem alta criticidade para um dos membros avaliados: as costas. Os resultados dos testes são apresentados nas subseções 6.1, 6.2 e 6.3. Uma comparação entre os resultados é apresentada na subseção 6.4.

Tabela 5.3. Dados de produtividade e do índice OCRA nas linhas e postos de trabalho. Fonte: Elaboração própria.

Linha <i>L</i>	Unidades esperadas na modelagem P_l	Unidades esperadas na simulação	Postos de trabalho <i>j</i>	Valor OCRA por intervalo de rotação e_j	Valor do índice OCRA total em cada posto
1	70.160	61.709	1 - 2 - 3 - 4	0,1125	2,25
2	8.800	4.381	5 - 6	0,155	3,10
3	7.120	4.290	7 - 8	0,106	2,12

Tabela 6.2. Criticidade do esforço por membros valorado em 3 segundo o método Sue Rodgers. Fonte: Elaboração própria.

Postos de trabalho <i>j</i>	<i>Criticidade segundo método Sue Rodgers em cada grupo muscular mencionado (m)</i>				
	1	2	3	4	5
1 - 2 - 3 - 4					
5 - 6	X				
7 - 8					

Na figura 6.1 encontram-se resumidos os testes realizados. No primeiro teste, foram gerados vários programas de rotação incluindo restrições de caráter ergonômico e de produtividade. Nesse primeiro teste foram desenvolvidas 11 iterações que seguem a metodologia proposta na subseção 5.3. No segundo teste, foi gerado um programa de rotação unicamente com restrições ergonômicas. Finalmente, com o terceiro teste, foi gerado um programa de rotação contemplando somente critérios de produtividade.

Todos os testes do modelo matemático foram realizados na linguagem de programação GAMS (*Generic Algebraic Modeling System*), versão 24.1.3, com o solver CPLEX versão 12.5.1. Todos os testes foram avaliados com um tempo limite de execução de 3600 segundos, configurando o *gap* relativo (diferença percentual entre o valor encontrado para a função objetivo e a melhor solução inteira possível/limitante inferior) em 0%.

Os testes da simulação computacional foram feitos no software ProModel versão Student 8.5.1.858. Foi utilizada uma máquina com processador Intel Core i7-4500, 1.8 GH e 8 GB de memória RAM.

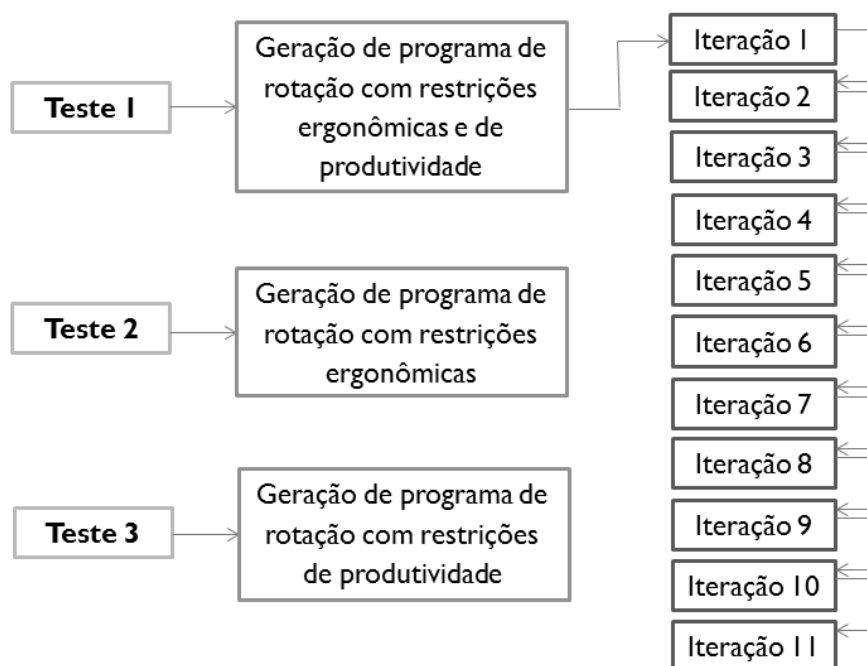


Figura 6.1. Caracterização de testes realizados. Fonte: Elaboração própria.

6.1. Resultados do primeiro teste: iterações

O programa de rotação foi configurado para ter uma expansão de uma semana útil (5 dias), sendo que cada dia de trabalho tem duração de 8 horas. Descansos não foram contemplados no modelo de otimização. Sendo o horizonte contínuo, se ao final de um dia um trabalhador foi alocado em um posto com criticidade m , no dia seguinte não pode iniciar no mesmo posto ou em outro posto com a mesma criticidade.

Na tabela 6.1.1. encontra-se o programa de rotação gerado no primeira iteração. Aos 4,622 segundos de execução o modelo alcançou um *gap* de 0,00%, ou seja, chegou à solução ótima. Observa-se que o maior valor do índice OCRA no último dia foi de 2,437, um valor bastante baixo comparado com o valor máximo (3,5). Nota-se também que os trabalhadores não apresentaram sobre esforços dos mesmos grupos musculares entre dois intervalos de rotação seguidos, pois os postos mais críticos (os postos 5 e 6) não foram ocupados de forma consecutiva em dois intervalos de rotação por um mesmo trabalhador.

Tabela 6.1.1. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, primeira iteração. Fonte: Elaboração própria.

Dia		1				2				3				4				5				OCRA TOTAL
Intervalo		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Trabalhador	1	3	8	7	3	3	5	8	4	1	5	7	5	4	5	3	4	5	2	1	4	2,437
	2	2	6	4	6	4	4	7	7	5	7	4	8	2	4	2	5	2	1	5	3	2,437
	3	6	3	5	2	8	3	4	6	2	4	6	7	8	8	8	7	6	4	3	7	2,417
	4	8	5	1	8	7	6	1	5	8	1	1	6	3	6	4	1	1	3	4	2	2,437
	5	5	2	2	7	1	1	2	1	3	6	3	4	6	7	1	6	3	7	8	5	2,437
	6	4	1	3	1	6	2	3	3	6	8	5	3	7	2	7	2	4	5	7	6	2,437
	7	7	7	8	5	2	8	5	2	7	3	2	2	5	1	5	3	8	8	6	1	2,417
	8	1	4	6	4	5	7	6	8	4	2	8	1	1	3	6	8	7	6	2	8	2,424

A variação do índice OCRA ao longo da semana pode ser observada na figura 6.2. Pode ser notado que o valor do índice OCRA dos trabalhadores vai se estabilizando à medida que a semana passa, sendo que o valor do OCRA para cada um deles ao finalizar a semana é bastante aproximado. No tocante à sequência de trabalho, observa-se que para o dia 1 o trabalhador 1 foi alocado nos postos 3, 8, 7 e 3 nos intervalos 1, 2, 3 e 4 respectivamente; no dia 2 este trabalhador

foi alocado de forma sequencial nos postos 3, 5, 8 e 4; no dia 3 teve a sequência 1, 5, 7, 5 e assim por diante até o dia 5. Observa-se que o trabalhador ocupou de forma consecutiva o posto de trabalho 3 na troca do último intervalo de rotação do dia 1 para o primeiro intervalo de rotação do dia 2, pois este posto não representa risco para grupos musculares segundo o método Sue Rodgers.

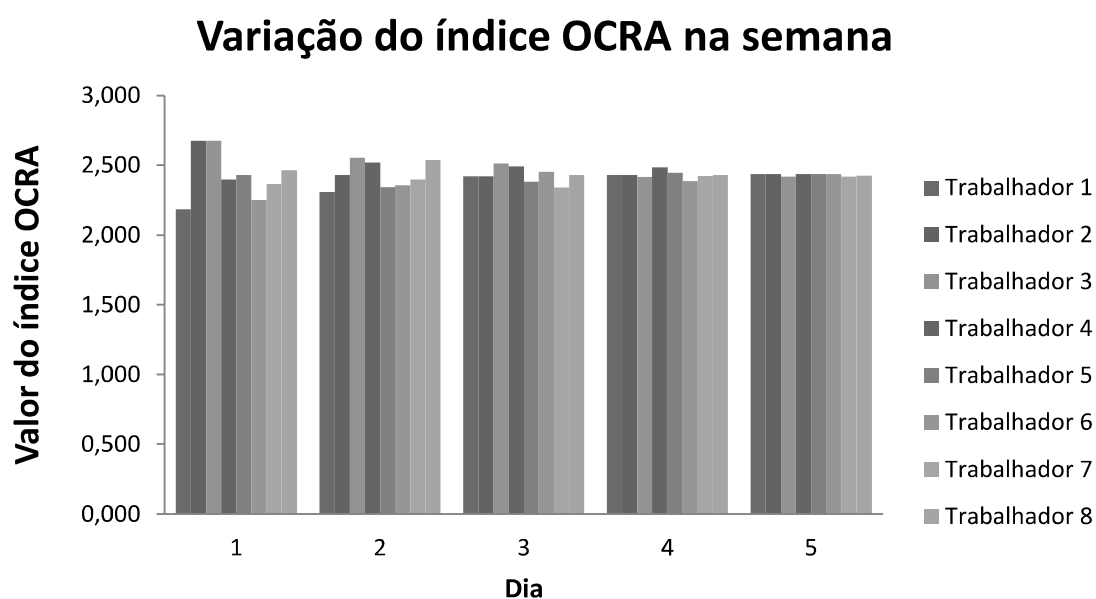


Figura 6.2. Variação do valor do índice OCRA ao longo da semana, primeira iteração. Fonte: Elaboração própria.

Em termos de produtividade, observa-se que não somente foi possível produzir a quantidade demandada em cada linha, como também estas foram ultrapassadas (tabela 6.1.2).

Tabela 6.1.2. Unidades produzidas por linha via otimização, primeira iteração. Fonte: Elaboração própria.

Linha l	Postos de trabalho j	Unidades esperadas iteração 1 P_l	Unidades produzidas iteração 1	Folga
1	1 - 2 - 3 - 4	70.160	70.224	64
2	5 - 6	8.800	8.810	10
3	7 - 8	7.120	7.149	29

Na sequência, a simulação computacional foi programada a partir do programa de rotação obtido na modelagem matemática. Na tabela 6.1.3, estão os resultados das paradas diárias em cada posto de trabalho, obtidos na primeira replicação da simulação. Pode-se apreciar que nos postos de trabalho pertencentes à linha 1 aconteceram mais paradas que nos outros postos de trabalho, sendo a duração média das paradas nestes locais maior que nos outros. Desta forma, a linha 1 pode ser considerada a mais crítica ao momento de gerar rotações dado o grande número de interrupções que acontecem.

Tabela 6.1.3. Paradas diárias em cada posto de trabalho, primeira replicação da simulação.

Fonte: Elaboração própria.

Linha	Posto de Trabalho	Número de paradas/Dia					Duração média parada (Min)
		1	2	3	4	5	
1	1	6	3	4	4	4	16,71
	2	5	5	4	5	4	
	3	5	5	4	4	5	
	4	4	5	6	4	4	
2	5	1	3	4	3	4	16,14
	6	4	4	2	3	3	
3	7	3	1	2	2	1	10,67
	8	2	3	3	1	4	

Os resultados do número de unidades produzidas por linha encontram-se na tabela 6.1.4. Na terceira coluna da tabela estão os valores de referência utilizados para avaliar a viabilidade do programa de rotação em termos de produtividade, que são o número médio de peças produzidas por semana em cada linha. Na quinta coluna está registrada a folga em cada linha (Valor esperado – Resultados da simulação). Observa-se que em duas das três linhas não foram alcançados os níveis de produtividade desejados, e assim, foi calculada a porcentagem em que o valor atual deve ser aumentado para atingir os níveis desejados (Folga/Resultados da simulação), como assinalado na coluna seis.

Tabela 6.1.4. Resultados de produtividade obtidos via simulação, primeira iteração. Fonte:

Elaboração própria.

Linha l	Postos de trabalho j	Unidades esperadas na simulação	Unidades produzidas na simulação	Folga	Razão
1	1 - 2 - 3 - 4	61.709	60.333	-1.376	-2,28%
2	5 - 6	4.381	6.008	1.627	27,08%
3	7 - 8	4.290	4.197	-93	-2,22%

Uma vez encontrada a porcentagem em que devem ser aumentados os valores atuais (2,28% e 2,22% respectivamente), as restrições de produtividade do modelo matemático foram ajustadas como pode se observar na tabela 6.1.5. Para a segunda iteração, somente o valor do parâmetro da linha 1 foi ajustado por dois motivos: 1) era o qual apresentava maior diferença percentual entre o valor esperado e o valor obtido na simulação, 2) para tentar evitar infactibilidade nas restrições relacionadas à produtividade, pois podem ser não satisfeitas.

Tabela 6.1.5. Parâmetros ajustados de produtividade para a re-otimização do modelo matemático.

Fonte: Elaboração própria.

Linha	Unidades esperadas na iteração 1 P_l	Unidades esperadas na iteração 2 P'_l
1	70.160	71.760
2	8.800	8.800
3	7.120	7.120

Os resultados do programa de rotação após o reajuste estão na tabela 6.1.6. Ao chegar aos 3.600 segundos de execução, o modelo alcançou um *gap* de 1,09%. Neste caso, o valor máximo do índice OCRA aumentou ligeiramente (em comparação à iteração anterior), chegando a 2,463.

Tabela 6.1.6. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, segunda iteração. Fonte:

Elaboração própria.

Dia		1				2				3				4				5				OCRA TOTAL
Intervalo		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Trabalhador	1	3	2	2	4	2	4	2	4	1	4	6	4	2	2	2	2	2	2	6	3	2,335
	2	2	6	4	5	1	1	5	1	2	3	4	2	4	5	4	4	4	4	5	4	2,462
	3	8	8	5	7	6	8	6	8	7	8	7	5	8	6	7	7	6	7	8	8	2,414
	4	4	3	1	3	4	6	1	5	4	6	1	1	6	4	5	1	3	3	2	2	2,463
	5	7	5	7	6	7	7	8	7	5	7	8	8	5	7	8	6	8	8	7	5	2,414
	6	6	1	3	2	3	2	3	3	3	2	5	3	3	3	3	5	1	5	4	6	2,462
	7	1	4	6	1	5	3	4	2	6	1	2	6	1	1	1	3	5	1	1	1	2,463
	8	5	7	8	8	8	5	7	6	8	5	3	7	7	8	6	8	7	6	3	7	2,427

Como observado na figura 6.3, o valor do índice OCRA ao longo da jornada de trabalho aumentou de forma diferente para os trabalhadores. Pode ser observado que nesta iteração a diferença entre os valores mínimo e máximo do índice para o último dia (2,335 e 2,463 respectivamente) foi maior que na interação anterior. Tal diferença foi esperada, pois ao incrementar a restrição de produtividade da linha 1 é reduzido o conjunto de soluções factíveis onde o OCRA possa ser melhor balanceado. Também, sob esta condição o modelo tende a alocar os trabalhadores mais produtivos na linha 1 durante períodos mais longos, sendo que essa linha é a que tem o segundo menor valor do OCRA dentre todas (a linha 3 tem o menor valor). Tome-se o caso do trabalhador 1, que ficou de forma contínua nessa linha durante 18 dos 20 intervalos de rotação totais, e obteve assim o valor mais baixo do índice. Observa-se também que o trabalhador 1 foi alocado em dois intervalos na linha 2, onde os postos de trabalho são os mais críticos, como estratégia niveladora do índice dentre todos os trabalhadores. Apesar das diferenças entre os valores mínimos e máximos, estes continuaram estando dentro do limite aceitável (abaixo de 3,5).

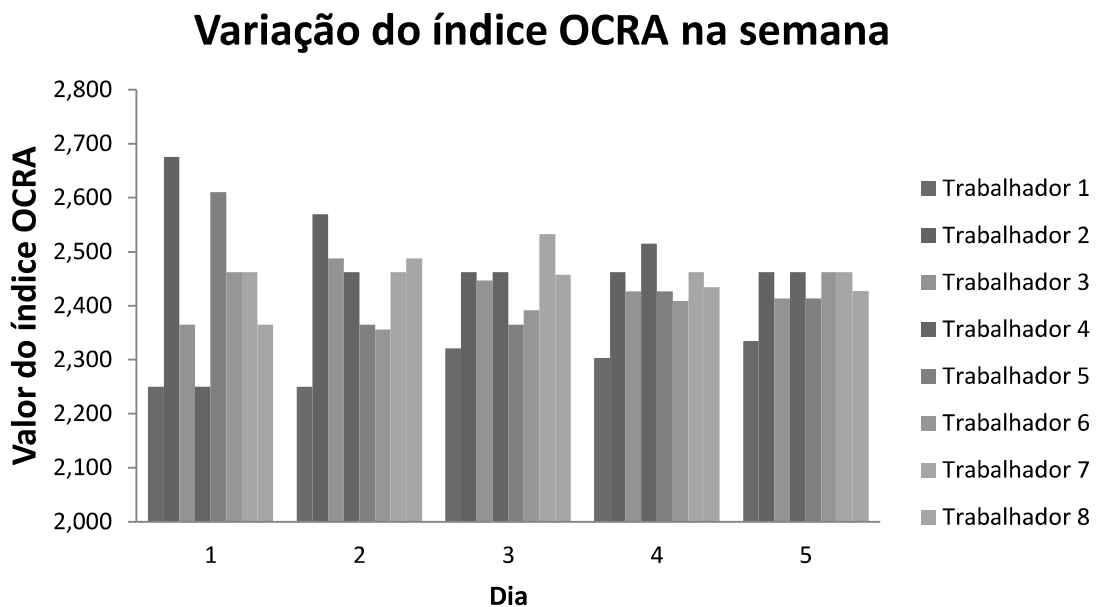


Figura 6.3. Variação do valor do índice OCRA ao longo da semana, segunda iteração. Fonte: Elaboração própria.

Na tabela 6.1.7 estão os resultados das unidades produzidas por linha. Observa-se que dessa vez, a folga entre o número de unidades produzidas e o número mínimo de unidades requeridas é menor do que na interação anterior.

Tabela 6.1.7. Unidades produzidas por linha via otimização, segunda iteração. Fonte: Elaboração própria.

Linha <i>l</i>	Postos de trabalho <i>j</i>	Unidades esperadas iteração 2 P'_l	Unidades produzidas iteração 2	Folga
1	1 -2 -3- 4	71.760	71.766	6
2	5 – 6	8.800	8.807	7
3	7 – 8	7.120	7.272	152

Ao programar a simulação com os resultados a partir da segunda iteração, em duas das três linhas foram atingidos os níveis de produtividade desejáveis. No entanto, a linha onde foi feito o reajuste inicial foi a mesma que apresentou déficit de produção, só que nessa vez o déficit foi menor, como observado na tabela 6.1.8.

Tabela 6.1.8. Resultados de produtividade obtidos via simulação, segunda iteração. Fonte:

Elaboração própria.

Linha <i>l</i>	Postos de trabalho <i>j</i>	Unidades esperadas na simulação	Unidades produzidas na simulação	Folga	Razão
1	1 - 2 - 3 - 4	61.709	60455	-1254	-2,07%
2	5 - 6	4.381	5976	1254	26,70%
3	7 - 8	4.290	4357	67	1,54%

Já que somente houve insuficiência de unidades produzidas na linha 1, o valor do parâmetro P_l (número de unidades a serem produzidas na linha l ao final do horizonte de planejamento) foi aumentado na restrição de produtividade dessa linha no modelo matemático. Nesse caso, o incremento não foi percentual. Ao aumentar o valor atual da restrição de produtividade para a linha 1 (71.760) em 2,07% foi gerada infactibilidade, pois a soma das unidades produzidas pelos trabalhadores ao final do horizonte de planejamento é menor do que 73.245 para todo o conjunto de soluções existentes. Assim, foram feitos pequenos aumentos progressivos no parâmetro de demanda da linha 1 para determinar até que ponto poderia continuar sendo acrescentada como apresentado na tabela 6.1.9.

Tabela 6.1.9. Parâmetros ajustados de produtividade para a re-otimização do modelo matemático. Fonte: elaboração própria.

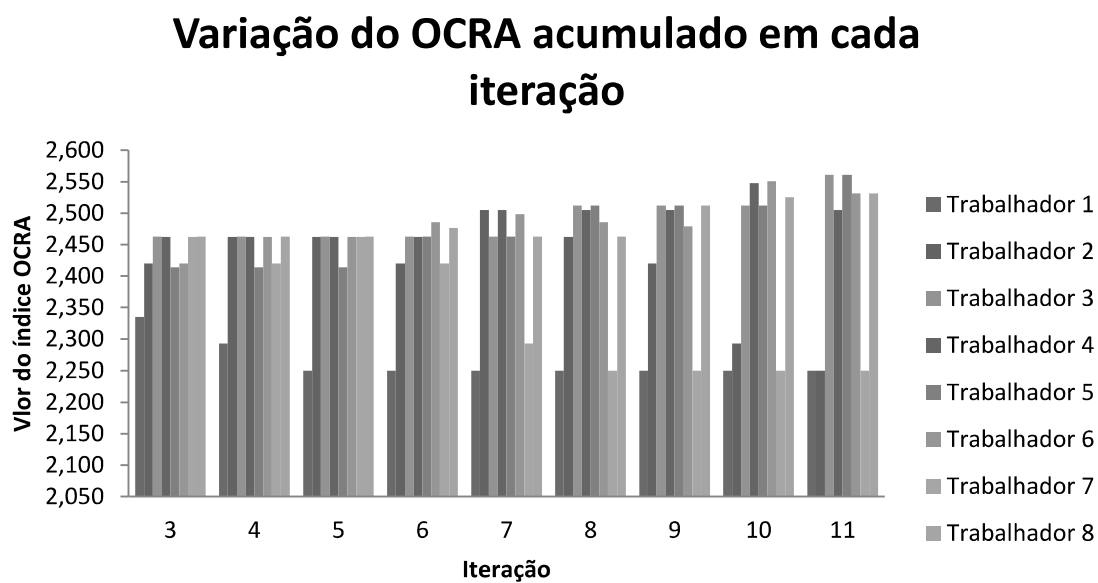
Linha	Unidades esperadas iteração 2 – P'_l	Unidades esperadas iteração 3 – P''_l	Unidades esperadas iteração 4 – P'''_l	Unidades esperadas iteração 5 – P^4_l	Unidades esperadas iteração 6 – P^5_l
1	71.760	71.800	71.850	71.900	71.950
2	8.800	8.800	8.800	8.800	8.800
3	7.120	7.120	7.120	7.120	7.120
Linha	Unidades esperadas iteração 7 – P^6_l	Unidades esperadas iteração 8 – P^7_l	Unidades esperadas iteração 9 – P^8_l	Unidades esperadas iteração 10 – P^9_l	Unidades esperadas iteração 11 – P^{10}_l
1	72.000	72.050	72.100	72.150	72.200
2	8.800	8.800	8.800	8.800	8.800
3	7.120	7.120	7.120	7.120	7.120

Os resultados das iterações podem ser observados na tabela 6.1.10. Como apresentado na coluna 2, para a maioria das instâncias foi atingida a solução ótima em tempos curtos, com exceção das instâncias 3, 8 e 10, que aos 3.600 segundos não chegaram à melhor solução, mas atingiram *gaps* inferiores ao 2%. Tal diferença em tempos de resolução pode ser devido a que em alguns casos, a solução ótima é mais difícil de encontrar dentro de um conjunto de soluções muito similares.

Respeito à variação do índice OCRA, na coluna 4 encontram-se os valores máximos achados deste índice e entre parênteses () o número de trabalhadores que alcançaram o valor máximo. Constata-se que a medida que é aumentado o parâmetro de unidades esperadas na linha 1, também aumenta o valor do índice ou o número de trabalhadores com o índice máximo, no entanto, este sempre ficou abaixo de 3,5. A tendência nas soluções caracteriza-se por alocar os trabalhadores mais produtivos na linha 1 por mais tempo na medida que aumenta a demanda nessa linha, lembrando que ali os postos têm o segundo OCRA mais baixo. Assim, aqueles trabalhadores menos produtivos na linha 1 rotacionaram entre as linhas 2 e 3, sendo eles possuidores dos índices mais altos. Na figura 6.4 pode ser enxergado como varia o índice ao longo das iterações, tendo que a diferença entre mínimos e máximos do índice é menos uniforme entre trabalhadores ao aumentar as demandas de produtividade pelo anteriormente mencionado.

Figura 6.4. Variação do índice OCRA acumulado de cada trabalhador através das iterações.

Fonte: Elaboração própria.



Finalmente, nas colunas 5, 6 e 7 da tabela 6.1.10 estão os valores das unidades esperadas, das unidades produzidas e das folgas para cada linha. Para as três linhas, todas as restrições de produtividade foram satisfeitas, havendo folga na maioria dos casos.

Tabela 6.1.10. Resultados das iterações estudadas via otimização. Fonte: Elaboração própria.

Iteração	Gap	Tempo de execução (s)	OCRA Total Acumulado	Unidades esperadas P_l			Unidades produzidas			Folga		
				Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3
3	0,49%	3600	2,463 (4)	71.800	8.800	7.120	71.812	8.800	7.224	12	0	104
4	0%	10,347	2,463 (5)	71.850	8.800	7.120	71.881	8.805	7.274	31	5	154
5	0%	8,207	2,463 (6)	71.900	8.800	7.120	71.900	8.806	7.274	0	6	154
6	0%	6,370	2,486 (1)	71.950	8.800	7.120	71.954	8.807	7.231	4	7	111
7	0%	34,145	2,505 (2)	72.000	8.800	7.120	72.004	8.804	7.253	4	4	133
8	0,68%	3600	2,512 (2)	72.050	8.800	7.120	72074	8.804	7.223	24	4	103
9	0%	42,958	2,512 (3)	72.100	8.800	7.120	72.104	8.820	7.212	4	20	92
10	1,23%	3600	2,551 (1)	72.150	8.800	7.120	72.152	8.858	7.190	2	58	70
11	0%	18,623	2,561 (2)	72.200	8.800	7.120	72.200	8.839	7.149	0	39	29

Todos os programas de rotação gerados em cada iteração foram testados via simulação. Os resultados são apresentados na tabela 6.1.11. Observa-se que até a iteração 6, na linha 1 não foram atingidas as unidades esperadas, no entanto, para as linhas 2 e 3 estes valores foram alcançados. Já na iteração 7, quando por primeira vez é cumprida a meta na linha 1, é observado um detrimento no número de unidades produzidas na linha 3, o qual pode se justificar pela maior permanência de trabalhadores altamente produtivos nas duas linhas na linha 1. Assim, enquanto aumenta o número de unidades produzidas na linha 1, o número de unidades produzidas na linha 3 cai. Já na última iteração, na linha 3 houve um déficit na produção, sendo que na linha 1 a produção foi a mais alta. Via otimização foi feito um reajuste, e observou-se infactibilidade ao aumentar percentualmente o valor da restrição de produtividade da linha 3, pelo que o procedimento finalizou com a iteração 11. Apesar das subidas e descidas na produção das linhas 1 e 3, a produtividade na linha 2 foi aproximadamente uniforme.

Tabela 6.1.11. Resultados das iterações estudadas via simulação. Fonte: Elaboração própria.

Iter.	Unidades esperadas na simulação			Unidades produzidas na simulação			Folga			Razão		
	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3	Linha 1	Linha 2	Linha 3
3	61.709	4.381	4.290	60.577	5.998	4.385	-1.132	1.617	95	-1,83%	36,91%	2,21%
4	61.709	4.381	4.290	60.686	5.993	4.396	-1.023	1.612	106	-1,66%	36,80%	2,47%
5	61.709	4.381	4.290	61.128	5.969	4.398	-581	1.588	108	-0,94%	36,25%	2,52%
6	61.709	4.381	4.290	61.484	5.965	4.400	-225	1.584	110	-0,36%	36,16%	2,56%
7	61.709	4.381	4.290	61.726	5.986	4.333	17	1.605	43	0,03%	36,64%	1,00%
8	61.709	4.381	4.290	61.776	5.982	4.324	67	1.601	34	0,11%	36,54%	0,79%
9	61.709	4.381	4.290	61.875	5.975	4.319	166	1.594	29	0,27%	36,38%	0,68%
10	61.709	4.381	4.290	61.950	5.974	4.315	241	1.593	25	0,39%	36,36%	0,58%
11	61.709	4.381	4.290	62.007	5.986	4.257	298	1.605	-33	0,48%	36,64%	-0,77%

6.2. Resultados do segundo teste: eliminação de restrições de produtividade

Um programa de rotação de postos de trabalho adicional foi gerado suprimindo as restrições de produtividade (ver restrição 5.5, subseção 5.1), deixando ativas somente a função objetivo, restrições de alocação e restrições relacionadas a risco ergonômico. Sob estas condições, a solução ótima foi atingida em 4,482 segundos. O OCRA máximo encontrado ao final da jornada foi igual a 2,437, mas diferentemente da primeira iteração (onde 5 trabalhadores alcançaram este valor do índice), neste caso somente dois trabalhadores atingiram esse valor.

Como observado na figura 6.5, o índice OCRA flutuou de forma que aqueles trabalhadores com valores do OCRA muito altos para um dia, foram alocados no dia seguinte a atividades que requeriam menos esforço, como estratégia compensatória. Por exemplo, no dia 3 o trabalhador 4 teve o valor do índice OCRA mais alto, mas no dia 4, ele esteve dentro dos trabalhadores com menor valor do índice. As alocações geradas pelo modelo matemático para cada dia de trabalho podem ser estão na tabela 6.2.1. Observa-se que todos os trabalhadores oscilaram entre as três linhas visando equilibrar a carga de trabalho.

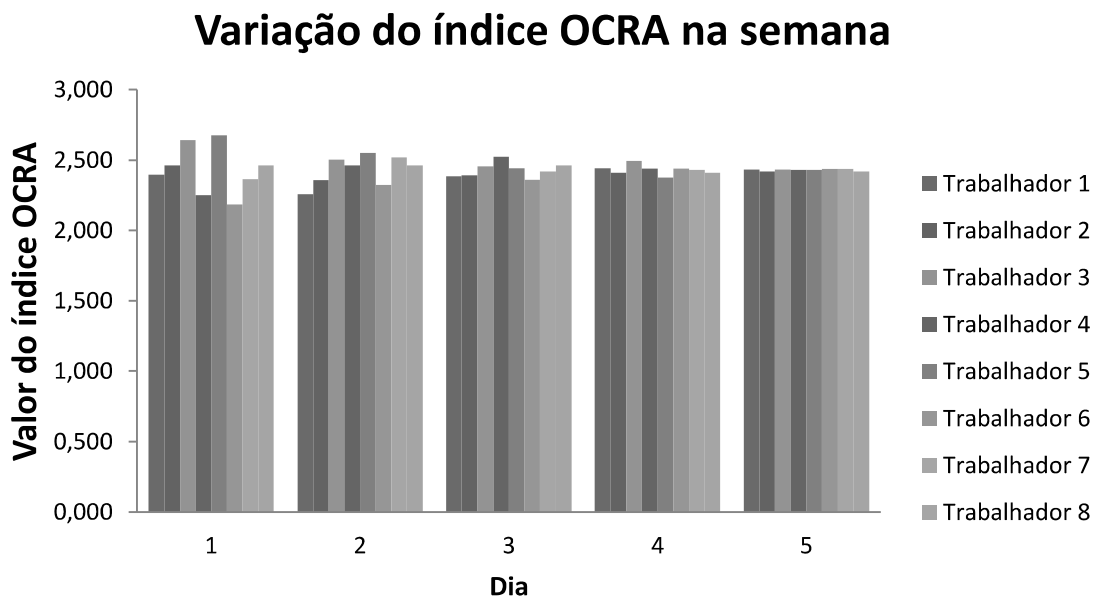


Figura 6.5. Aumento do valor do índice OCRA ao longo da semana, eliminação de restrições de produtividade. Fonte: Elaboração própria.

Tabela 6.2.1. Programa de rotação gerado pela otimização do modelo, eliminação de restrições de produtividade. Fonte: Elaboração própria.

Dia		1				2				3				4				5				OCRA TOTAL
Intervalo		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Trabalhador	1	1	6	7	8	8	8	7	8	6	7	6	1	6	7	5	8	5	8	8	2	2,434
	2	4	1	4	6	4	2	2	1	4	6	1	2	3	6	4	4	4	5	4	1	2,420
	3	2	5	8	5	7	7	8	6	8	8	5	8	5	8	7	6	3	7	2	7	2,434
	4	3	3	3	2	5	4	6	2	2	5	7	5	7	4	8	2	7	6	7	3	2,430
	5	5	2	5	1	1	5	3	7	7	2	2	4	8	2	2	7	6	1	5	8	2,430
	6	7	7	1	3	3	6	1	3	5	3	8	3	2	5	3	5	8	2	6	4	2,437
	7	8	8	6	7	6	1	4	5	3	4	4	7	1	1	6	1	2	4	3	5	2,437
	8	6	4	2	4	2	3	5	4	1	1	3	6	4	3	1	3	1	3	1	6	2,420

Ao utilizar o programa de rotação obtido na programação matemática por meio da simulação computacional, levando em consideração tanto as paradas como as flutuações de produtividade dos trabalhadores, pode-se observar não passou em duas restrições de produtividade (linhas 1 e 3), mas foi próximo (tabela 6.2.2). Para as linhas 1 e 3 o programa teve um déficit de 1.974 e 57 unidades respectivamente, situação que era esperada dada a ausência de vínculo da aptidão do trabalhador para um dado posto de trabalho no momento de gerar o programa de rotação; no entanto, a aplicar o programa de rotação no sistema real poderia ser factível atingir os níveis de demanda, pois sempre há ajustes a fazer que os modelo de simulação/otimização não conseguem captar.

Tabela 6.2.2. Resultados de produtividade obtidos via simulação, eliminação de restrições de produtividade. Fonte: Elaboração própria.

Linha <i>l</i>	Postos de trabalho <i>j</i>	Unidades esperadas na simulação	Unidades produzidas na simulação	Folga	Razão
1	1 - 2 - 3 - 4	61.709	59.735	-1.974	-3,30%
2	5 - 6	4.381	5.942	1.561	26,27%
3	7 - 8	4.290	4.233	-57	-1,35%

6.3. Resultados do segundo teste: eliminação de critérios ergonômicos

Com o objetivo de estabelecer comparações entre resultados, foi gerado um programa de rotação onde os trabalhadores foram alocados aos postos de trabalho em que são mais produtivos. Tal programa foi gerado empiricamente, sem levar em consideração restrições de ordem ergonômica e não são feitas ao longo do dia, senão na troca de um dia para outro. O programa obtido pode ser observado na tabela 6.3.1. Apesar do valor do OCRA sempre se manter abaixo de 3,5, dois trabalhadores (3 e 6) foram alocados em períodos consecutivos a postos de trabalho com o impacto mais crítico na região das costas (postos 5 e 6, pertencentes à linha 2) segundo o método Sue Rodgers. Esta situação não é desejável, pois pode ocasionar dores no curto prazo e afastamentos no longo prazo.

Tabela 6.3.1. Programa de rotação ao eliminar restrições de caráter ergonômico. Fonte:
Elaboração própria.

Dia	1	2	3	4	5	OCRA TOTAL	
Trabalhador	1	2	3	1	4	3	2,25
	2	1	2	4	3	2	2,25
	3	5	6	5	6	5	3,10
	4	3	1	3	2	1	2,25
	5	7	8	7	8	7	2,12
	6	6	5	6	5	6	3,10
	7	4	4	2	1	4	2,25
	8	8	7	8	7	8	2,12

Na figura 6.6, pode se evidenciar que os valores do índice OCRA dos trabalhadores foram bastante díspares, sendo o valor máximo 3,1 e o mínimo 2,12. Nessa vez, cada trabalhador permaneceu na mesma linha de produção de começo a fim. Por tal motivo, o valor máximo do índice chegou a 3,1, que é o valor correspondente à linha 2.

Varição do índice OCRA na semana

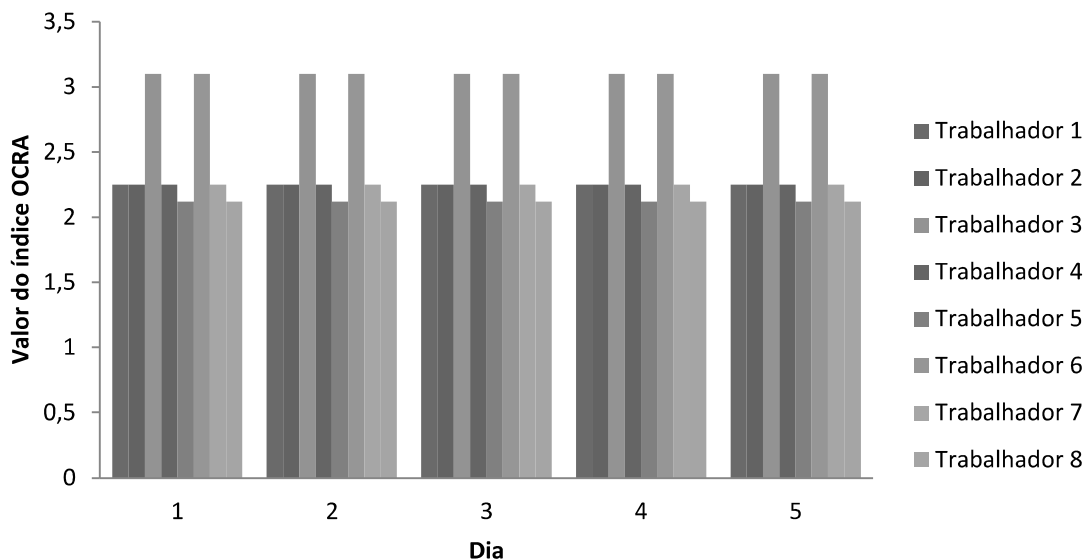


Figura 6.6. Variação do índice OCRA na semana, eliminação de restrições de caráter ergonômico. Fonte: Elaboração própria.

Ao avaliar este programa de rotação empregando a simulação computacional, observou-se um resultado superior a todos os demais programas em termos de produtividade (tabela 6.3.2). Nesse caso, o número de unidades produzidas nas linhas 1 (61.967 unidades) e 3 (4.388 unidades) foi maior do que no programa gerado na terceira iteração (61.886 e 4.328 unidades respectivamente), onde todos os requerimentos de unidades produzidas foram satisfeitos. Já o número de unidades produzidas na linha 2 diminuiu, passando de 6.002 unidades na terceira iteração para 5.972 unidades no programa atual, mas mesmo assim continuou sendo bastante alto.

Tabela 6.3.2. Resultados de produtividade obtidos via simulação, eliminação de restrições de caráter ergonômico. Fonte: Elaboração própria.

Linha l	Postos de trabalho j	Unidades esperadas na simulação	Unidades produzidas na simulação	Folga	Razão
1	1 - 2 - 3 - 4	61.709	61.967	258	0,42%
2	5 - 6	4.381	5.972	1.591	26,64%
3	7 - 8	4.290	4.388	98	2,23%

6.4. Comparação entre soluções

A partir dos resultados dos cenários avaliados, é conveniente efetuar comparações para analisar o comportamento das variáveis. Na tabela 6.4.1 estão os resultados do índice OCRA máximo para cada um dos cenários estudados. São listados também a porcentagem total de produtividade atingida em cada linha por cenário, assim como a porcentagem média de produtividade em cada cenário.

Observa-se que se bem na maioria dos programas gerados não foram alcançados os níveis de produtividade para as linhas 1 e 3, para a linha 2 os valores desejados foram ultrapassados em todos os cenários. Tal situação é o resultado da premissa de que os trabalhadores alocados na linha 2 ali permanecem do início ao fim da jornada. Na realidade, muitas vezes só um trabalhador permanece ali, enquanto o outro realiza atividades várias como auxiliar na área de saúde e segurança com a coleta de dados. Isso ocorre como medida providencial para evitar que um trabalhador fique exposto durante longos períodos aos riscos associados ao posto, principalmente, ao levantamento de material pesado.

Tabela 6.4.1. Resultados de produtividade e do índice OCRA nos cenários estudados. Fonte: Elaboração própria.

TESTES	Teste 1 Iteração 1	Teste 1 Iteração 2	Teste 1 Iteração 3	Teste 1 Iteração 4	Teste 1 Iteração 5
Linha 1	137,14%	136,43%	136,91%	136,80%	136,25%
Linha2	97,77%	97,97%	98,17%	98,34%	99,06%
Linha 3	97,83%	101,56%	102,21%	102,47%	102,52%
Média	110,91%	111,99%	112,43%	112,54%	112,61%
OCRA máximo	2,437	2,463	2,463	2,463	2,463
TESTES	Teste 1 Iteração 6	Teste 1 Iteração 7	Teste 1 Iteração 8	Teste 1 Iteração 9	Teste 1 Iteração 10
Linha 1	136,16%	136,64%	136,54%	136,38%	136,36%
Linha2	99,64%	100,03%	100,11%	100,27%	100,39%
Linha 3	102,56%	101,00%	100,79%	100,68%	100,58%
Média	112,79%	112,56%	112,48%	112,44%	112,44%
OCRA máximo	2,486	2,505	2,512	2,512	2,551

TESTES	Teste 1 Iteração 11	Teste 2	Teste 3
Linha 1	136,64%	135,63%	135,01%
Linha2	100,48%	96,80%	100,52%
Linha 3	99,23%	98,67%	103,80%
Média	112,12%	110,37%	113,11%
OCRA máximo	2,561	2,437	3,100

De acordo com a figura 6.7 é possível dizer, com algumas exceções, que na medida em que a produtividade total aumenta, o valor do índice OCRA também aumenta. No caso estudado, à medida que aumentaram as restrições de produtividade nos postos de trabalho pertencentes à linha 1, cujo índice OCRA é baixo (2,25), o modelo tendia a alocar os trabalhadores mais produtivos ali por períodos cada vez mais longos, relegando aos demais trabalhadores os postos de trabalho com maior risco ergonômico. O decremento na produtividade total acompanhado do aumento do índice OCRA nos cenários 7 ao 11 devem-se a que neles somente está se favorecendo a linha 1, cujo benefício é a expensas da produtividade na linha 3. Ressalta-se que todas as soluções são não dominadas, ou seja, que nenhuma dela é absolutamente melhor do que todas.

Índice OCRA vs Produtividade

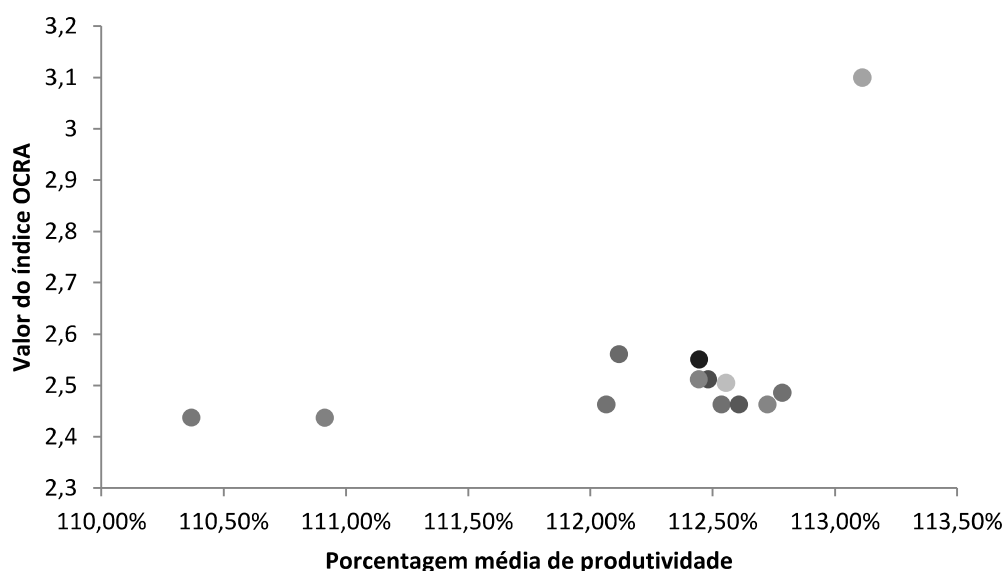


Figura 6.7. Índice OCRA vs. Produtividade nos cenários. Fonte: Elaboração própria.

Assim, considerando um *trade-off* entre produtividade e minimização da exposição ao risco ergonômico, das alternativas testadas, a recomendação seria adotar o programa de rotação proposto gerada na iteração 7. Neste cenário encontra-se um bom balanceamento entre produtividade em todas as linhas e minimização de riscos ergonômicos em comparação aos outros programas onde ou o risco é muito alto com produtividade alta, ou é baixo com produtividade baixa ou é alto com produtividade moderadamente alta. Apesar desta alternativa indicar um valor do índice OCRA acima da média, evita-se que os trabalhadores sejam alocados de forma contínua aos postos de trabalho com alta criticidade para as costas segundo o método Sue Rodgers. Em comparação com o programa do Teste 3, que é onde é atingida a maior produtividade, a diferença de produtividade média é de só de 0,55%. Uma possível desvantagem do programa da iteração 7 é que 3 trabalhadores são alocados na mesma linha durante todo o horizonte de planejamento, algo que poderia lhes provocar tédio. No entanto, a partir do encontrado por Raina e Dickerson (2009), Keir, Sanei e Holmes (2011), Horton, Nussbaum e Agnew (2012) e Leider et al. (2015), do ponto de vista ergonômico é melhor que os trabalhadores permaneçam nesses postos de baixa demanda física continuamente antes de aloca-los a postos de maior demanda. Esta estratégia se justifica, pois os trabalhadores estão habituados a permanecer nesses postos e a mudança a postos de altas demandas poderia incrementar sua fadiga. Ressalta-se que cada um dos programas pode ser implementado dependendo das circunstâncias e das preferências do tomador de decisão, já que em cada um deles há um nível de balanceamento de ergonomia-produtividade diferente.

A respeito da factibilidade de implementação dos programas de rotação, é recomendável conduzir um processo de diálogo com os trabalhadores para escutar e levar em consideração suas opiniões e toma-las como *feedback* como sugerido por Aptel et al., (2008). Esse procedimento visa garantir que os trabalhadores não ficarão insatisfeitos com o programa de rotação projetado.

7. CONCLUSÕES

A presente pesquisa fundamentou-se no estudo do problema de alocação e sequenciamento de trabalhadores sob critérios ergonômicos e de produtividade. A representação do sistema foi baseada em uma empresa de manufatura com três linhas de produção. Os processos do sistema são aderentes às características representadas na formulação matemática do problema, como repetitividade, sobre esforços em alguns membros corporais (neste caso, nas costas) e metas de produção unitárias por linha.

A formulação matemática desenvolvida para abordar o problema foi baseada no modelo proposto por Carnahan, Redfern e Norman (2000), sendo a presente proposta similar à de Boenzi et al. (2015) ao querer incorporar ergonomia e produtividade na otimização. A formulação apresentada diferencia-se dos trabalhos anteriormente mencionados pela inclusão de mais de um critério ergonômico, a incorporação da produtividade de cada indivíduo em diferentes atividades, o desenvolvimento de um modelo de programação linear inteira mista e a utilização de simulação computacional como ferramenta de incorporação de aleatoriedade. Via otimização foram gerados diversos programas de rotação, cuja efetividade em condições estocásticas foi analisada através de uma simulação computacional. Três testes foram efetuados, no primeiro incluindo considerações de tipo produtivo e ergonômico, desenvolvendo iterações para chegar a vários níveis de *trade-off*. No segundo teste, o programa foi desenvolvido com considerações unicamente ergonômicas; e no terceiro, somente foram incorporados critérios de produtividade.

Os estudos computacionais realizados foram baseados em uma mesma instância, sendo que foram feitas modificações pontuais nesta para analisar melhor o comportamento das variáveis estudadas. Foi comprovada a capacidade do modelo para representar um sistema real e gerar soluções factíveis, sujeitas a implementação. Em termos de qualidade, soluções ótimas e próximas à ótima foram encontradas. Os tempos de execução do modelo, no entanto, variaram dependendo das modificações feitas nos parâmetros, mesmo sendo a instância de pequeno porte.

A simulação computacional permitiu avaliar a efetividade dos programas de rotação gerados pela otimização do modelo ao ser submetido a paradas de diversas origens e levando em consideração a produtividade dos trabalhadores em termos de uma distribuição de probabilidade

para cada posto de trabalho. Verificou-se que pode ser atingido um bom *trade-off* entre produtividade e diminuição de exposição a riscos ergonômicos.

Em geral, foi possível observar que o risco ergonômico aumenta na medida em que se procura aumentar a produtividade do sistema. Por tal motivo, é aconselhável que ambos os critérios sejam levados em consideração no momento de projetar esquemas de alocação de trabalhadores a postos de trabalho ou a atividades.

No tocante à combinação de técnicas, a abordagem proposta é bastante útil para avaliar a robustez de uma solução fornecida por um modelo determinístico sob condições mais realistas, sujeitas a alta variabilidade. A proposta pode ser ampliada para situações similares, fazendo adaptações dos critérios ergonômicos e/ou de produtividade segundo os requisitos da situação estudada, sendo necessário testar a combinação de técnicas com outras instâncias.

7.1. Perspectiva para pesquisas futuras

Os frutos da presente pesquisa, da mesma forma que as singularidades do sistema estudado (ambientes com repetitividade de tarefas), promovem o desenvolvimento de pesquisas futuras que envolvam decisões de *Personnel Scheduling* a partir de diferentes perspectivas.

A metodologia proposta provou ser adequada para a instância estudada, caracterizada por ser de pequeno porte. Assim, o rendimento tanto da modelagem como da simulação computacional poderão ser avaliados com instâncias diversas e de maior tamanho. Desta forma será possível determinar até onde é viável implementar a metodologia, em termos de qualidade da solução e em termos de tempo de resolução.

No capítulo 1 foi mencionado que a presente pesquisa somente leva em consideração aspectos relacionados à saúde física dos trabalhadores e a produtividade. Assim, recomenda-se levar em conta na modelagem aspectos relacionados à saúde física dos trabalhadores (exposição a vibrações, ruído, cansaço, pressão, etc.), saúde mental (preferências de alocação a postos de trabalho/turnos de trabalho/tempo livres, tédio, aprendizagem) junto com requisitos, premissas e/ou estratégias da empresa (minimização de custos, maximização dos lucros, balanceamento da produção, entre outros). Já para um estudo de caráter macroergonômico, recomenda-se uma metodologia mais robusta, sugerindo a simulação baseada em agentes como ferramenta de apoio,

pois emula as relações entre os indivíduos (agentes) com inteligência e autonomia atribuídas, modelando o ambiente onde acontece a interação e captando a evolução no comportamento dos agentes ao introduzir mudanças em seu entorno.

Nesta pesquisa foi gerado um programa de rotação dentro de uma mesma área, que pode ser repetido de forma contínua ao longo do tempo. Uma possível perspectiva futura pode ser a efetuação de macro rotações (rotações entre áreas) visando capacitar e ter maior flexibilidade da mão de obra, incluindo as percepções dos trabalhadores. Recomenda-se também o desenvolvimento de estudos longitudinais onde o efeito das rotações na saúde dos trabalhadores ao longo do tempo seja avaliado, utilizando grupos de controle e definindo com maior clareza o tipo de atividade e riscos a que os trabalhadores são expostos.

8. REFERÊNCIAS

AKBARI, M.; ZANDIEH, M.; DORRI, B. Scheduling part-time and mixed-skilled workers to maximize employee satisfaction. **The International Journal, of Advanced Manufacturing Technology**, Bedford, v. 64, n. 5-8, p. 1017–1027, Mar. 2012.

ALFARES, H. K. A simulation approach for stochastic employee days-off scheduling. **International Journal of Modelling and Simulation**, Calgary, v. 27, n. 1, p. 9–15, 2007.

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S. Learning curve models and applications: Literature review and research directions. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 41, n. 5, p. 573–583, Sept. 2011.

ANZANELLO, M. J.; FOGLIATTO, F. S.; SANTOS, L. Learning dependent job scheduling in mass customized scenarios considering ergonomic factors. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 154, p. 136–145, Aug. 2014.

APTEL, M. et al. Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against MSDs. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 38, n. 11-12, p. 900–909, Nov. 2008.

ARYANEZHAD, M. B. et al. Designing safe job rotation schedules based upon workers' skills. **The International Journal, of Advanced Manufacturing Technology**, Bedford, v. 41, n. 1-2, p. 193–199, Mar. 2008.

ASENSIO-CUESTA, S. et al. A genetic algorithm for the design of job rotation schedules considering ergonomic and competence criteria. **The International Journal, of Advanced Manufacturing Technology**, Bedford, v. 60, n. 9/12, p. 1161–1174, 2012a.

ASENSIO-CUESTA, S. et al. A method to design job rotation schedules to prevent work-related musculoskeletal disorders in repetitive work. **International Journal of Production Research**, Philadelphia, v. 50, n. 24, p. 7467–7478, 2012b.

ATLASON, J.; EPELMAN, M. A. Call center staffing with simulation and cutting plane methods. **Annals of Operations Research**, Norwell, v. 127, p. 333–358, 2004.

AVRAMIDIS, A. N.; CHAN, W.; L'ECUYER, P. Staffing multi-skill call centers via search methods and a performance approximation. **IIE Transactions**, Philadelphia, v. 41, n. 6, p. 483–497, Apr. 2009.

AYOUB, M. M. et al. **Determination and modeling of lifting capacity**. Lubbock: Institute for Biotechnology, Texas Tech University, 1978.

AYOUGH, A.; ZANDIEH, M.; FARSIJANI, H. GA and ICA approaches to job rotation scheduling problem: considering employee's boredom. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Bedford, v. 60, n. 5/8, p. 651–666, Nov. 2011.

AZIZI, N.; LIANG, M. An integrated approach to worker assignment, workforce flexibility acquisition, and task rotation. **Journal of the Operational Research Society**, Oxford, v. 64, n. 2, p. 260–275, May 2012.

AZIZI, N.; ZOLFAGHARI, S.; LIANG, M. Modeling job rotation in manufacturing systems: The study of employee's boredom and skill variations. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 123, n. 1, p. 69–85, Jan. 2010.

BARTEL, A.; ICHNIOWSKI, C.; SHAW, K. How does information technology really affect productivity? Plant-level comparisons of product innovation, process improvement and worker skills. **The Quarterly Journal of Economics**, Cambridge, v. 122, n. 4, p. 1721–1758, 2007.

BHADURY, J.; RADOVILSKY, Z. Job rotation using the multi-period assignment model. **International Journal of Production Research**, Philadelphia, v. 44, n. 20, p. 4431–4444, Oct. 2006.

BHATTACHARYA, A.; MCGLOTHLIN, J. D. **Occupational ergonomics: theory and applications**. 2nd. ed. Boca Raton: CRC Press, 2012. p. 1332

BLACK, S. E.; LYNCH, L. M. What's driving the new economy?: the benefits of workplace innovation. **The Economic Journal**, St Andrews, v. 114, n. 493, p. F97–F116, Feb. 2004.

BLACK, S.; LYNCH, L. How to compete: the impact of workplace practices and information technology on productivity. **Review of Economics and Statistics**, Cambridge, v. 83, n. 3, p. 434–445, 2001.

BLOOM, N.; REENEN, J. VAN. Why do management practices differ across firms and countries? **Journal of Economic Perspectives**, Nashville, v. 24, n. 1, p. 203–224, 2010.

BOENZI, F. et al. Productivity and ergonomic risk in human based production system: a job-rotation scheduling model. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 171, part 4, Jan. 2016. [Article in press]

BRASIL. Ministério da Previdência Social. Instituto Nacional do Seguro Social; Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência Social. **Anuário estatístico da Previdência Social**. Brasília, DF: Ministério da Previdência. (2009).

BRASIL. Ministério da Previdência Social. Instituto Nacional do Seguro Social; Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência Social. **Anuário estatístico da Previdência Social**. Brasília, DF: Ministério da Previdência. (2010).

BRASIL. Ministério da Previdência Social. Instituto Nacional do Seguro Social; Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência Social. **Anuário estatístico da Previdência Social**. Brasília, DF: Ministério da Previdência. (2011).

BRASIL. Ministério da Previdência Social. Instituto Nacional do Seguro Social; Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência Social. **Anuário estatístico da Previdência Social**. Brasília, DF: Ministério da Previdência. (2012).

BRASIL. Ministério da Previdência Social. Instituto Nacional do Seguro Social; Empresa de Tecnologia e Informações da Previdência Social. **Anuário estatístico da Previdência Social**. Brasília, DF: Ministério da Previdência. (2013).

BRASIL. Ministério da Previdência Social. **Primeiro boletim quadrimestral sobre benefícios por incapacidade**. Disponível em: <<http://www.previdencia.gov.br/wp-content/uploads/2014/04/I-Boletim-Quadrimestral-de-Beneficios-por-Incapacidade1.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Dor relacionada ao trabalho: lesões por esforços repetitivos (LER), Distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (Dort)**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2012.

CARNAHAN, B. J.; REDFERN, M. S.; NORMAN, B. Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search. **Ergonomics**, London, v. 43, n. 4, p. 543–560, 2000.

CENTRO DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA. **Informação em saúde do trabalhador**. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.cvs.saude.sp.gov.br/gt.asp?te_codigo=20>. Acesso em: 30 fev. 2015.

CEZIK, M.; L'ECUYER, P. Staffing multiskill call centers via linear programming and simulation. **Management Science**, Maryland, v. 54, p. 310–323, 2007.

CHENGALUR, S. N.; RODGERS, S. H.; BERNARD, T. E. **Kodak's ergonomic design for people at work**. 2nd. ed. Hoboken: Wiley, 2003. p. 704.

COROMINAS, A.; PASTOR, R.; RODRÍGUEZ, E. Rotational allocation of tasks to multifunctional workers in a service industry. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 3–9, Sept. 2006.

COŞGEL, M. M.; MICELI, T. J. Job rotation: cost, benefits, and stylized facts. **Journal of Institutional and Theoretical Economics**, Tübingen, v. 155, n. 2, p. 301–320, 1999.

COSTA, A. M.; MIRALLES, C. Job rotation in assembly lines employing disabled workers. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 120, n. 2, p. 625–632, Aug. 2009.

DAVIS, K.; JORGENSEN, M. Ergonomics. Pros and cons of job rotation as a means of reducing injury costs. **Journal of Occupational and Environmental Hygiene**, Philadelphia, v. 2, p. D1 – D3, Jan. 2005.

DE GRIP, A.; SAUERMAN, J. The effect of training on productivity: the transfer of on-the-job training from the perspective of economics. **Educational Research Review**, Orlando, v. 8, p. 28–36, Jan. 2013.

DIEGO-MÁS, J. A. et al. A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules. **International Journal of Industrial Ergonomics**, Amsterdam, v. 39, n. 1, p. 23–33, 2009.

DÜCK, V. et al. Increasing stability of crew and aircraft schedules. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, Amsterdam, v. 20, n. 1, p. 47–61, Feb. 2012.

ERIKSSON, T. O. R.; ORTEGA, J. The adoption of job rotation: testing the theories. **ILRReview**, Ithaca, v. 59, n. 4, 2006.

ERTOGRAL, K.; BAMUQABEL, B. Developing staff schedules for a bilingual telecommunication call center with flexible workers. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 54, n. 1, p. 118–127, Feb. 2008.

FILUS, R.; OKIMORTO, M. L. The effect of job rotation intervals on muscle fatigue - lactic acid. **Work**, Reading, v. 41, p. 1572–1581, Jan. 2012.

FRAZER, M. B. et al. The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain. **Ergonomics**, London, v. 46, n. 9, p. 904–19, July 2003.

FRY, H. Overuse syndrome in musicians: prevention and management. **Lancet**, London, v. 328, n. 8509, p. 728 – 731, 1986.

GITTLEMAN, M.; HORRIGAN, M.; JOYCE, M. “Flexible” workplace practices evidence from a nationally representative survey. **Industrial & Labor Relations Review**, Ithaca, v. 52, n. 1, p. 99–115, 1998.

GUIMARÃES, L. B. D. M.; ANZANELLO, M. J.; RENNER, J. S. A learning curve-based method to implement multifunctional work teams in the Brazilian footwear sector. **Applied ergonomics**, Oxford, v. 43, n. 3, p. 541–7, May 2012.

HAIMS, M. C.; CARAYON, P. Work organization interventions. **International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors**, London, v. 3, p. 1441–1445, 2002.

HILL, A. V. **The encyclopedia of operations management: a field manual and glossary of operations management terms and concepts**. Upper Saddle River: Pearson Education, 2012. p. 400

HOJATI, M. Near-optimal solution to an employee assignment problem with seniority. **Annals of Operations Research**, Norwell, v. 181, n. 1, p. 539–557, Aug. 2010.

HORTON, L. M.; NUSSBAUM, M. A; AGNEW, M. J. Effects of rotation frequency and task order on localised muscle fatigue and performance during repetitive static shoulder exertions. **Ergonomics**, London, v. 55, n. 10, p. 1205–17, Jan. 2012.

HOSSEINABADI, R. et al. The effect of quality circles on job satisfaction and quality of work-life of staff in emergency medical services. **International emergency nursing**, Oxford, v. 21, n. 4, p. 264–70, Oct. 2013.

HUANG, H. J. Job rotation from the employees' point of view. **Research and Practice in Human Resource Management**, Perth, v. 7, n. 1, p. 75–85, 1999.

INTERNATIONAL LABOUR ORGANIZATION. **Wages, a workers' education manual**. 3rd. ed. Geneva: International Labour Organization, 1982. p. 179

JOHNSON, M. D. et al. Functional versus dysfunctional team change: problem diagnosis and structural feedback for self-managed teams. **Organizational Behavior and Human Decision Processes**, Amsterdam, v. 122, n. 1, p. 1–11, Sept. 2013.

JORGENSEN, M. et al. Characteristics of job rotation in the midwest US manufacturing sector. **Ergonomics**, London, v. 48, n. 15, p. 1721–33, Dec. 2005.

KABAK, Ö. et al. Efficient shift scheduling in the retail sector through two-stage optimization. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 184, n. 1, p. 76–90, Jan. 2008.

KAIZER, J. S.; HELLER, A. K.; OBERKAMPF, W. L. Scientific computer simulation review. **Reliability Engineering & System Safety**, Amsterdam, v. 138, p. 210–218, June 2015.

KARWOWSKI, W. **International encyclopedia of ergonomics and human factors**. 2nd ed. Boca Raton: CRC Press, 2006. v. 3, p. 3728.

KARWOWSKI, W.; MARRAS, W. S. **The occupational ergonomics handbook**. Boca Raton: CRC Press, 1999. p. 2088

KEIR, P. J.; SANEI, K.; HOLMES, M. W. R. Task rotation effects on upper extremity and back muscle activity. **Applied ergonomics**, Oxford, v. 42, n. 6, p. 814–9, Nov. 2011.

KELTON, W. D.; SADOWSKI, R. P.; SADOWSKI, D. A. **Simulation with Arena**. 3rd. ed. Boston: McGraw-Hill, 2003. p. 668

KILBOM, A. Repetitive work of the upper extremity " Part II - The scientific basis (knowledge base) for the guide. In: NATIONAL INSTITUTE OF OCCUPATIONAL HEALTH (Ed.). **Ergonomics guidelines and problem solving**. Solna: Elsevier Ergonomics Book Series, 2000. p. 151–178.

KLEINER, B. M. Macroergonomics: analysis and design of work systems. **Applied ergonomics**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 81–9, Jan. 2006.

KOIKE, K. Skill formation systems in the U.S. and Japan: a comparative study. In: AOKI, M (Ed.). **The Economic analysis of the Japanese firm**. Amsterdam: Elsevier, 1984. p. 47–75.

KUIJER, P. P.; VISSER, B.; KEMPER, H. C. Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department. **Ergonomics**, London, v. 42, n. 9, p. 1167–78, Sept. 1999.

KUMAR, R. **Human resource management**: strategic analysis text and cases. New Delhi: I. K. International Publishing House, 2011. p. 488

L. DE GRANO, M.; MEDEIROS, D. J.; EITEL, D. Accommodating individual preferences in nurse scheduling via auctions and optimization. **Health Care Management Science**, Bussum, v. 12, n. 3, p. 228–242, Oct. 2008.

LAZEAR, E. P.; ROSEN, S. Male-female wage differentials in job-ladders. **Journal of Labor Economics**, Chicago, v. 8, n. 1, p. S106–S123, 1990.

LEIDER, P. C. et al. Effects of job rotation on musculoskeletal complaints and related work exposures: a systematic literature review. **Ergonomics**, London, v. 58, n. 1, p. 18–32, Jan. 2015.

LILES, D. H. et al. Human Factors : the journal of the human factors and ergonomics society. **Human Factors**, Thousand Oaks, v. 26, n. 2, p. 683–693, 1984.

LILES, D. H. The application of the job severity index to job design for the control of manual materials-handling injury. **Ergonomics**, London, v. 29, n. 1, p. 65–76, 1986.

LUGER, T. et al. The influence of task variation on manifestation of fatigue is ambiguous - a literature review. **Ergonomics**, London, v. 57, n. 2, p. 162–74, Jan. 2014.

MAENO, M. et al. **Lesões por esforços repetitivos (LER) distúrbios osteomusculares relacionados ao trabalho (DORT)**. Brasília, DF: Ministério da Saúde, 2006.

MALINSKI, R. M. Job rotation in an academic library : damned if you do and damned if you don't ! **Library Trends**, Urbana, v. 50, n. 4, p. 673–680, 2002.

MICHALOS, G. et al. Dynamic job rotation for workload balancing in human based assembly systems. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Amsterdam, v. 2, n. 3, p. 153–160, Jan. 2010.

MICHALOS, G.; MAKRIS, S.; CHRYSOLOURIS, G. The effect of job rotation during assembly on the quality of final product. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, Amsterdam, v. 6, n. 3, p. 187–197, Jan. 2013.

MICHALOS, G.; MAKRIS, S.; MOURTZIS, D. A web based tool for dynamic job rotation scheduling using multiple criteria. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, Amsterdam, v. 60, n. 1, p. 453–456, Jan. 2011.

MOREIRA, M. C. O.; COSTA, A. M. Hybrid heuristics for planning job rotation schedules in assembly lines with heterogeneous workers. **International Journal of Production Economics**, Amsterdam, v. 141, n. 2, p. 552–560, Feb. 2013.

MORTON, D. P.; POPOVA, E. A Bayesian stochastic programming approach to an employee scheduling problem. **IIE Transactions**, Philadelphia, v. 36, n. 2, p. 155–167, Feb. 2004.

NUNES, I. L.; BUSH, P. M. Work-related musculoskeletal disorders assessment and prevention. In: NUNES, I. L. (Ed.). **Ergonomics: a systems approach**. [S.l.]: InTech, 2012. p. 1–31.

OBERKAMPF, W. L.; ROY, C. J. **Verification and validation in scientific computing**. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

OCCHIPINTI, E. OCRA: a concise index for the assessment of exposure to repetitive movements of the upper limbs. **Ergonomics**, London, v. 41, n. 9, p. 1290–311, Sept. 1998.

OSTERMAN, P. How common is workplace transformation and who adopts it? **Industrial & Labor Relations Review**, Ithaca, v. 47, n. 2, p. 173–188, 1994.

OTTO, A.; SCHOLL, A. Incorporating ergonomic risks into assembly line balancing. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 212, n. 2, p. 277–286, July 2011.

OTTO, A.; SCHOLL, A. Reducing ergonomic risks by job rotation scheduling. **OR Spectrum**, New York, v. 35, n. 3, p. 711–733, 4 Apr. 2012.

PICOLOTO, D.; SILVEIRA, E. DA. Prevalência de sintomas osteomusculares e fatores associados em trabalhadores de uma indústria metalúrgica de Canoas - RS. **Ciência & Saúde Coletiva**, Rio de Janeiro, v. 13, p. 507–516, 2008.

PROKOPENKO, J. **Productivity management: a practical handbook**. Geneva: International Labour Office, 1987. p. 287

QIN, J. et al. Upper extremity kinematic and kinetic adaptations during a fatiguing repetitive task. **Journal of electromyography and kinesiology: official journal of the International Society of Electrophysiological Kinesiology**, Oxford, v. 24, n. 3, p. 404–11, June 2014.

RADEMACHER, H. et al. Influences of mechanical exposure biographies on physical capabilities of workers from automotive industry: a study on possible dose-response relationships and consequences for short and long term job rotation. **Work**, Reading, v. 41 Suppl 1, p. 5114–20, Jan. 2012.

RAINA, S. M.; DICKERSON, C. R. The influence of job rotation and task order on muscle fatigue: a deltoid example. **Work**, Reading, v. 34, n. 2, p. 205–13, Jan. 2009.

RAJABALIPOUR CHESHMEHGAZ, H. et al. Accumulated risk of body postures in assembly line balancing problem and modeling through a multi-criteria fuzzy-genetic algorithm. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 503–512, Sept. 2012.

RISSÉN, D. et al. Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation. **Work & Stress**, London, v. 16, n. 2, p. 127–137, June 2002.

RODGERS, S. H. Job evaluation in worker fitness determination. **Occupational Medicine**, Philadelphia, v. 3, n. 2, p. 219–239, 1988.

SATO, T. D. O.; COURY, H. J. C. G. Evaluation of musculoskeletal health outcomes in the context of job rotation and multifunctional jobs. **Applied ergonomics**, Oxford, v. 40, n. 4, p. 707–12, July 2009.

SAWHNEY, R. Implementing labor flexibility: a missing link between acquired labor flexibility and plant performance. **Journal of Operations Management**, Amsterdam, v. 31, n. 1-2, p. 98–108, Jan. 2013.

SEÇKINER, S. U.; KURT, M. A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 188, n. 1, p. 31–45, May 2007.

SEÇKINER, S. U.; KURT, M. Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem. **Applied Mathematics and Computation**, New York, v. 201, n. 1-2, p. 149–160, July. 2008.

SHIN, T. Earnings inequality within organizations. **Social Science Research**, Amsterdam, v. 38, n. 1, p. 225–238, Mar. 2009.

SIMONEAU, S.; ST-VINCENT, M.; CHICOINE, D. **Work-related musculoskeletal disorders (WMSDs): a better understanding for more effective prevention**. Saint-Léonard: IRSST: A.S.P. Métal-Électrique, 1996. p. 1–54

STEFANEC, N. P. Incentive pay: productivity, sorting, and adjacent rents. **The Journal of Socio-Economics**, Greenwich, v. 39, n. 2, p. 171–179, Apr. 2010.

TAYYARI, F.; SMITH, J. L. **Occupational ergonomics: principles and applications**. London: Chapman & Hall, 1997. (Manufacturing Systems Engineering Series).

THARMMAPHORNPHILAS, W. et al. Applying mathematical modeling to create job rotation schedules for minimizing occupational noise exposure. **AIHA Journal**, Fairfax, v. 64, n. 3, p. 401–405, May 2003.

THARMMAPHORNPHILAS, W.; NORMAN, B. A. A quantitative method for determining proper job rotation intervals. **Annals of Operations Research**, Norwell, v. 128, n. 1-4, p. 251–266, 2004.

THARMMAPHORNPHILAS, W.; NORMAN, B. A. A methodology to create robust job rotation schedules. **Annals of Operations Research**, Norwell, v. 155, n. 1, p. 339–360, 7 jul. 2007.

VAN DEN BERGH, J. et al. Personnel scheduling: a literature review. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 226, n. 3, p. 367–385, May 2013.

VOLGENANT, A. A note on the assignment problem with seniority and job priority constraints. **European Journal of Operational Research**, Amsterdam, v. 154, n. 1, p. 330–335, Apr. 2004.

WATERS, T. R. et al. Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting task. **Ergonomics**, London, v. 36, n. 7, p. 749–776, 1993.

WELLS, R.; MCFALL, K.; DICKERSON, C. R. Task selection for increased mechanical exposure variation: relevance to job rotation. **Ergonomics**, London, v. 53, n. 3, p. 314–23, Mar. 2010.

WINKEL, J.; WESTGAARD, R. Editorial: a model for solving work related musculoskeletal problems in a profitable way. **Applied ergonomics**, Oxford, v. 27, p. 71–77, 1996.

XU, Z. et al. Design of assembly lines with the concurrent consideration of productivity and upper extremity musculoskeletal disorders using linear models. **Computers & Industrial Engineering**, Amsterdam, v. 62, n. 2, p. 431–441, Mar. 2012.

YANG, S.; ZHENG, L. The paradox of de-coupling: A study of flexible work program and workers' productivity. **Social Science Research**, Amsterdam, v. 40, n. 1, p. 299–311, Jan. 2011.

ZWICK, T. Employee participation and productivity. **Labour Economics**, Amsterdam, v. 11, n. 6, p. 715–740, Dec. 2004.

GLOSSÁRIO

Algoritmo de busca: Conjunto prescrito de instruções e regras que está projetado para localizar elementos com características específicas dentro de uma estrutura de dados.

Algoritmo guloso: Algoritmo que efetua escolhas ótimas locais em cada estágio com o objetivo de encontrar um ótimo global. Em muitos problemas, não sempre chega à solução ótima, mas pode atingir soluções ótimas locais aproximadas às ótimas globais em pouco tempo.

Artrose: Doença crônica degenerativa que produz alteração destrutiva da cartilagem e das articulações.

Bursite: Inflamação e irritação da Bursa, saco cheio de fluido que age como um amortecedor entre os músculos, tendões e ossos

Busca tabu: Procedimento metaheurístico, pertencente à classe de busca local que utiliza estruturas de memória, pois uma vez que uma solução potencial é determinada é chamada de “tabu”, assim o algoritmo não visita de novo tal solução.

Colônia de formigas: Algoritmo probabilístico para solucionar problemas computacionais que podem ser reduzidos a procurar os melhores caminhos ou rotas em grafos. O algoritmo é baseado no comportamento de formigas que procuram um caminho entre sua colônia e uma fonte de comida.

Curva de esquecimento: Curva que ilustra o declínio de retenção de informação com o tempo. A curva mostra como a informação é perdida no tempo quando não existe um esforço por retê-la.

Determinístico: Eventos ou sistemas onde a aleatoriedade não está envolvida no desenvolvimento de seus futuros estados.

Dorsalgia: Dor que aparece nas costas que geralmente é originado nos músculos, nervos, ossos, articulações ou outras estruturas na coluna vertebral.

Estocástico: Eventos ou sistemas que são imperecíveis devido a influencia de aleatoriedade.

Heurística: Em computação, é uma técnica para resolver problemas de forma mais rápida quando os métodos exatos são muito demorados ou para encontrar soluções aproximadas quando os métodos exatos não conseguem chegar nela.

Metaheurística: Método heurístico para dar solução a um tipo de problema de problema computacional geral, utilizando os parâmetros dados pelo programador sobre uns procedimentos genéricos e abstratos de uma forma que, espera-se, seja eficiente. Geralmente são aplicadas a problemas que não têm um algoritmo ou heurística específica que chegue a uma solução satisfatória ou quando não é possível implementar um método exato.

Osteólise: Desgaste e diminuição de uma ou mais áreas de ossos quando não são produzidas suficientes células ósseas para substituir as antigas.

Osteonecrose: Morte do osso causada por uma irrigação sanguínea insuficiente. É mais comum nos quadris e no ombro, mas pode afetar outras articulações como os joelhos ou cotovelos.

Plano sagital: plano imaginário que divide um organismo pela metade, separando-o em direita e esquerda.

Pressão intra-abdominal: Pressão em estado passivo da cavidade abdominal, com mudanças durante a ventilação mecânica ou espontânea, os quais podem causar aumento durante a inspiração ou diminuição durante a expiração.

Pressão intradiscal: Pressão em estado passivo dos discos intervertebrais que fornece estabilidade e que, quando sujeita a uma carga externa, aumenta dependendo de fatores como a posição e peso da carga levantada.

Programação inteira: Programa de otimização matemática onde as variáveis estas restritas a serem inteiras.

Programação linear: Campo da otimização matemática dedicado a minimizar ou maximizar uma função linear, denominada função objetivo, de forma que as variáveis da função estejam sujeitas a restrições expressas por meio de um sistema de inequações também lineares.

Programação linear inteira mista: Programa de otimização onde algumas das variáveis do problema, ao igual que as restrições e a função objetivo são inteiras enquanto outras são lineares.

Programação não linear: Processo de resolver problemas de otimização onde algumas das restrições ou a função objetivo são não lineares.

Pronação: Movimento do antebraço que faz virar a mão de fora para dentro e colocar a palma da mão para abaixo ou para dentro.

Simulated Annealing: Metaheurística probabilística genérica para o problema de otimização global, inspirada no processo de arrefecimento de aço e cerâmicas. Em cada iteração o método avalia alguns vizinhos do estado atual e probabilisticamente decide entre efetuar uma transição a um novo estado ou ficar no estado atual.

Síndrome cervicobraquial: Dor nos tecidos moles da coluna cervical e/ou músculo escaleno causado por sobrecarga de peso ou a efetuação de esforços físicos intensos e súbitos.

Sinovite: Inflamação ou irritação da membrana sinovial que reveste as articulações, como consequência do aumento do líquido que produz a membrana, conhecido como líquido sinovial.

Supinação: Movimento do antebraço que faz virar a mão de dentro para fora e colocar a palma da mão para cima ou para frente.

Tecido conjuntivo: É um dos quatro tipos de tecido biológico que suporta, conecta ou separa diferentes tipos de tecidos e órgãos no corpo humano.

Tecido mole: São os tecidos que conectam, suportam ou rodeiam estruturas e órgãos do corpo diferentes a ossos.

Tendinite: Inflamação, irritação e inchaço de um tendão.

Tenossinovite: Inflamação do tendão e da membrana sinovial.