

LINA MARCELA GUERRA GARCÍA

**AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA AMBIÊNCIA E BEM-ESTAR EM
UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE CAFÉ POR VIA ÚMIDA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2018

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G934a Guerra Garcia, Lina Marcela, 1979-
2018 Avaliação e otimização da ambiência e bem-estar em
unidades de processamento de café por via úmida / Lina Marcela
Guerra Garcia. – Viçosa, MG, 2018.
xi, 126f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Orientador: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco.
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.
Inclui bibliografia.

1. Ergonomia. 2. Café. 3. Bem-estar. 4. Conforto humano.
5. Arquitetura - Fatores humanos. I. Universidade Federal de
Viçosa. Departamento de Engenharia Agrícola. Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. II. Título.

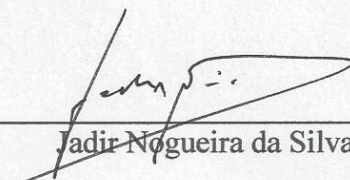
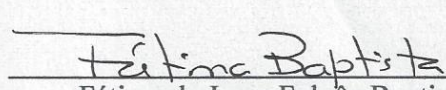
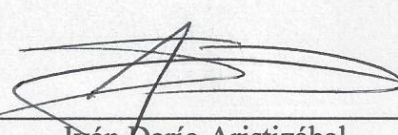
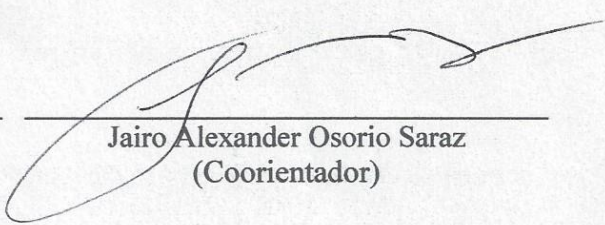
CDD 22. ed. 620.82

LINA MARCELA GUERRA GARCÍA

**AVALIAÇÃO E OTIMIZAÇÃO DA AMBIÊNCIA E BEM-ESTAR EM
UNIDADES DE PROCESSAMENTO DE CAFÉ POR VIA ÚMIDA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 22 de fevereiro de 2018.

 _____ Jadir Nogueira da Silva	 _____ Fátima de Jesus Folgôa Baptista
 _____ Iván Darío Aristizábal	 _____ Jairo Alexander Osorio Saraz (Coorientador)
 _____ Ilda de Fátima Ferreira Tinôco (Orientadora)	

Este trabalho é dedicado ao meu filho e ao meu esposo que acompanharam, apoiaram e ajudaram em seu desenvolvimento. Sem eles este trabalho não seria possível.

AGRADECIMENTOS

À professora Ilda de Fátima Ferreira Tinôco e ao AMBIAGRO, pela oportunidade, pela confiança, pelo apoio, assim como pela valiosa orientação. Aos professores Fernando da Costa Baêta e Joyce Correna Carlo, por me orientarem com paciência e dedicação.

Às instituições que ajudaram no desenvolvimento desta pesquisa: Universidade Federal de Viçosa, especialmente o Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Nacional da Colômbia e seu Departamento de Ingeniería Agrícola, à CAPES, ao CNPq e à FAPEMIG.

Especialmente ao professor Jairo Alexander Osório Saraz e família, pela ajuda a mim e a minha família, durante esse processo, tanto na orientação do trabalho, quanto no apoio incondicional.

À professora Lêda Rita D'Antonino Faroni, pelo apoio incondicional, pela acolhida e ajuda a mim e minha família.

À professora Cecília de Fátima Souza e família, pela acolhida e pela ajuda nos momentos de dificuldade no Brasil.

A todo o pessoal da UFV, corpo docente, funcionários e colegas que de alguma forma tornaram possível eu alcançar esse grande sucesso.

Ao povo brasileiro, por me acolher e aceitar com tanto carinho durante o tempo do meu doutorado.

Aos cafeicultores do norte de Antioquia na Colômbia, por me abrirem as portas e permitir o início do desenvolvimento desta pesquisa.

Ao meu filho Martin e meu esposo por me darem força a cada dia para continuar; aos meus pais, minhas irmãs e meu sobrinho, por me apoiarem em todos os momentos.

A todos que direta ou indiretamente fizeram possível esta pesquisa e minha estadia no Brasil.

BIOGRAFIA

LINA MARCELA GUERRA GARCÍA, filha de Maria Olga Garcia Muñoz e Jose Imer Guerra Pulgarín, nasceu em 20 de dezembro de 1979, em Medellín, Antioquia, Colômbia.

Em setembro de 2004, formou-se em Arquitetura pela Universidade Nacional de Colômbia.

Em agosto de 2010, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente, pela Universidade Federal de Viçosa, formando-se como mestre em setembro de 2012.

Em janeiro de 2014, trabalhou como docente ocasional da disciplina de Construções Rurais, na Universidade Nacional de Colômbia.

Em agosto de 2014, iniciou o Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na área de Construções Rurais e Ambiente, pela Universidade Federal de Viçosa.

Em 2016 e 2017, trabalhou como docente ocasional da disciplina Construções Rurais, na Universidade Nacional de Colômbia, e como docente de cátedra da disciplina Construções Agroindustriais, na Universidade Pontifícia Bolivariana.

SUMÁRIO

RESUMO.....	viii
ABSTRACT.....	x
INTRODUÇÃO GERAL.....	1
CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DE TIPOLOGIAS ARQUITETÔNICAS DE UNIDADES PARA PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ.....	8
1. INTRODUÇÃO.....	8
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	9
3. RESULTADOS.....	10
3.1. Instalação para processamento úmido de café no município de Barbosa.....	10
3.2. Instalação para processamento úmido de café no município de Bello.....	12
3.3. Instalação para processamento úmido de café no município de San Roque.....	24
4. CONCLUSÕES.....	31
5. REFERÊNCIAS.....	32
CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO ERGONÔMICA EM UNIDADES TIPOLÓGICAS DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ NA COLÔMBIA.....	33
1. INTRODUÇÃO.....	33
1.1. Técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC).....	34
1.2. Técnica da Frequência de Pulso (FP).....	35
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
2.1. Carga física de trabalho.....	38
2.1.1. Técnica da Frequência de Pulso (FP).....	38
2.2. Avaliação postural.....	41
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
3.1. Carga física de trabalho.....	43
3.1.1. Análise de dados com a técnica da Frequência de Pulso (FP).....	43
3.1.2. Análise de dados com a técnica de Frequência Cardíaca Contínua (FCC) ...	45
3.2. Análise postural.....	49
3.2.1. Processo de despulpamento do café.....	49
3.2.2. Processo de lavagem do café.....	50
3.2.3. Processo de classificação hidráulica do café.....	52
3.2.4. Processo de secagem (baixar camada de café dentro da secadora).....	54
3.2.5. Processo de secagem (alimentação do combustível da secadora).....	56
4. CONCLUSÕES.....	61
5. REFERÊNCIAS.....	62

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE BIOCLIMÁTICA DE UNIDADES TIPOLOGICAS DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ NA COLÔMBIA, A PARTIR DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS ENERGYPLUS™	65
1. INTRODUÇÃO	65
2. MATERIAL E MÉTODOS	68
2.1. Estudo de temperatura e umidade relativa do ar através de mapeamento a partir de dados experimentais	68
2.2. Estudo de simulação computacional	71
2.2.1. Elaboração, verificação e validação do modelo de simulação aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café	71
2.2.2. Análise do IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação	76
2.2.3. Análise do comportamento higrotérmico nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação	77
2.2.4. Análise do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação	78
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	79
3.1. Estudo de simulação computacional	82
3.1.1. Elaboração, verificação e validação do modelo de simulação aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café	82
3.1.2. Análise do IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação	83
3.1.3. Análise do comportamento higrotérmico nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café aplicando o modelo de simulação	84
3.1.4. Análise do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação	88
4. CONCLUSÕES	89
5. REFERÊNCIAS.....	90
CAPÍTULO 4 – OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM UNIDADES DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	93
1. INTRODUÇÃO	93
2. MATERIAL E MÉTODOS	96
2.1. Simulações a partir de EnergyPlus™	97
2.2. Simulações a partir de CFD	105
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
3.1. Simulações a partir de EnergyPlus™	107
3.1.1. Grupo de projetos 1 (GP1)	107
3.1.2. Grupo de projetos 2 (GP2)	112

3.2. Simulações a partir de CFD	118
4. CONCLUSÕES	119
5. REFERÊNCIAS.....	121
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS	124

RESUMO

GUERRA GARCÍA, Lina Marcela, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2018. **Avaliação e otimização da ambiência e bem-estar em unidades de processamento de café por via úmida.** Orientadora: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Coorientadores: Fernando da Costa Baêta, Jairo Alexander Osório Saraz e Joyce Correna Carlo.

Esta pesquisa é um dos primeiros estudos sobre ambiência nas unidades de processamento úmido de café e a primeira pesquisa de ergonomia nesse tipo de instalação agroindustrial. Seu desenvolvimento foi baseado em unidades tipológicas representativas dessas construções na cafeicultura colombiana. Na abordagem do tema foram consideradas as condições do ambiente térmico para o trabalhador, assim como sua ergonomia dentro dessas instalações, e o ambiente térmico para o café principalmente na parte de armazenamento, na busca de um ambiente onde trabalhador e café possam coexistir adequadamente. Esta pesquisa teve como objetivo realizar uma avaliação da ambiência e bem-estar em unidades de processamento de café por via úmida, tanto para o café quanto para os operários, buscando otimizar as construções através de modificações que deram lugar a novos modelos. Quatro estudos foram realizados para alcançar a otimização dessas instalações: “Caracterização de tipologias arquitetônicas de unidades para processamento úmido de café”; “Avaliação ergonômica em unidades tipológicas de processamento úmido de café na Colômbia”; “Análise bioclimática de unidades tipológicas de processamento úmido de café na Colômbia a partir de simulações computacionais EnergyPlusTM”, e “Otimização das condições ambientais em unidades de processamento úmido de café através de simulação computacional”. Este trabalho permitiu caracterizar três tipologias arquitetônicas de unidades de processamento úmido de café na Colômbia. Também permitiu detectar as atividades do processamento úmido de café com maiores riscos ergonômicos em cada tipologia e fazer recomendações para minimizá-los. Foi possível estabelecer, de forma geral e pontual, o comportamento da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e do IBUTG nessas instalações, a fim de apresentar modificações arquitetônicas por meio de simulação computacional, que finalmente resultaram em condições ambientais mais adequadas às necessidades do trabalhador e do café. Por ser um dos primeiros trabalhos em ambiência e o primeiro em ergonomia para esse tipo de instalação agroindustrial, espera-se que contribua para o fortalecimento do acervo dessa

área do conhecimento e possa servir para o avanço do setor cafeicultor da Colômbia, do Brasil e, em geral, da América Latina, a partir dos conceitos de bioclimática e de ergonomia aplicados às unidades de processamento de café por via úmida.

ABSTRACT

GUERRA GARCÍA, Lina Marcela, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2018. **Optimization of the thermal and environmental conditions in wet coffee processing units in the north of Antioquia in Colombia.** Adviser: Ilda de Fátima Ferreira Tinôco. Co-advisers: Fernando da Costa Baêta, Jairo Alexander Osório Saraz and Joyce Correna Carlo.

This research is one of the first studies on ambience in wet coffee processing units and is the first ergonomic research in this type of agroindustrial facilities. Its development was based on representative typological units of these constructions in Colombian coffee growing. In the approach to the topic, the conditions of the thermal environment for the worker as well as their ergonomics within these facilities were considered, and the thermal environment for coffee, especially in the storage area, in the search for an environment where worker and coffee can coexist properly. This research had the objective of evaluating the ambience and well being in wet coffee processing units, both for coffee and for the workers, seeking to optimize the buildings through modifications that gave rise to new models. Four studies were carried out to achieve the optimization of these facilities: Chapter 1 "Characterization of architectural typologies of units for wet coffee processing"; Chapter 2 "Ergonomic evaluation in typological units of wet coffee processing in Colombia"; Chapter 3 "Bioclimatic analysis of typological units of wet coffee processing in Colombia, from EnergyPlus™ computational simulations", and Chapter 4 "Optimization of environmental conditions in wet coffee processing units through computational simulation". This work allowed to determine three architectural typologies of wet coffee processing units in Colombia. It also allowed to detect the activities of wet coffee processing with greater ergonomic risks in each typology, and to make recommendations to minimize them. It was possible to establish in a general and punctual manner the behavior of air temperature, relative humidity and IBUTG in these facilities, to present architectural modifications through computational simulation, which finally resulted in environmental conditions more in line with the needs of the worker and the coffee. Being one of the first works in ambience and the first in ergonomics for this type of agroindustrial facilities, it is hoped that it will contribute to strengthen the collection of this area of knowledge and may serve for the advancement of the coffee

sector of Colombia, Brazil and in general of Latin America, based on the concepts of bioclimatic and applied ergonomics in wet coffee processing units.

INTRODUÇÃO GERAL

A produção de café representa o sustento econômico para uma importante parcela da população mundial, gerando 125 milhões de empregos no conjunto da África, Ásia e América Latina, assim como EUA, Porto Rico e Austrália (FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC, 2015). A América Latina é a maior região produtora de café no mundo, com o Brasil e a Colômbia ocupando, respectivamente, a primeira e a terceira posição no cenário mundial, somando juntos mais de 40% da produção do planeta (INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO, 2015).

Verifica-se que as exigências relativas à qualidade da bebida estão aumentando no mercado de café (PALACIN et al., 2009). Nesse sentido, a pós-colheita é considerada uma das etapas mais importantes nesse processo. Estima-se que ela influencia em mais de 50% na qualidade do produto final (GIOMO, 2012). A esse respeito, Osório Hernandez et al. (2015) afirmam que a qualidade também se vê influenciada pelas condições bioclimáticas das instalações para o processamento do café, incluído o armazenamento.

Para avaliar as condições ambientais de qualquer instalação, é necessário estudar a sua arquitetura. No entanto, há poucos estudos sobre a arquitetura das unidades para processamento úmido de café que descrevam o projeto e sua relação direta com a eficiência do processo, com os materiais utilizados e com a ambiência. São destacados estudos com avaliação da ventilação natural e seu efeito na temperatura e umidade relativa do ar recomendadas para o café, dentro de instalações desse tipo na Colômbia (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2015, 2016).

Por outro lado, estudos sobre condições ambientais para trabalhadores sugerem que o microclima no interior das unidades de processamento de café também pode influir na produtividade e na qualidade do trabalho. Moura (2015) assegura que o trabalhador desconforme com o seu ambiente térmico pode perder a motivação pelo trabalho, desconcentrar-se e expor-se a aumento na acidentalidade e redução na qualidade do trabalho e do desempenho.

O processamento do café por via úmida é uma técnica bastante comum na Colômbia, e no Brasil vem ganhando força pouco a pouco nos últimos anos (ANDRADE, 2010). Esse processamento compõe atividades como despulpamento, fermentação, lavagem, classificação hidráulica e secagem dos grãos (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016), que são executadas pelos operários.

Nesse processo, os funcionários são expostos a calor e vapores gerados pelas máquinas (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016), além de esforços físicos próprios do ofício. Essa situação pode gerar redução na produtividade e na qualidade do trabalho humano em razão do desconforto a que os trabalhadores estariam sendo submetidos. Contudo, as exigências físicas dos operários nas unidades de processamento úmido de café e suas consequências ainda não foram estudadas.

Maia e Rodrigues (2012) e Maia, Ferraz e Rodrigues (2016) relataram que estudos sobre a segurança no trabalho em ambientes rurais são recentes e ainda há falta de informação em avaliações em alguns setores e atividades. Por esse motivo, segundo esses autores, existe a necessidade de estudos que enfrentem potenciais não conformidades e que forneçam sugestões para contribuir para a melhoria do conforto ambiental, segurança e qualidade de vida dos trabalhadores.

A carga física de trabalho e as análises posturais são estudos ergonômicos comumente aplicados no contexto laboral.

No meio industrial, para avaliar a carga física de trabalho são usados métodos práticos, com indicadores fisiológicos, que a associam a uma atividade muscular dinâmica de trabalho. A frequência cardíaca é considerada um desses indicadores, a qual pode ser avaliada através da técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC) (CARVALHO et al., 2011; EVANGELISTA, 2011) e da técnica da Frequência de Pulso (FP) (MARTÍNEZ; CUBILLOS, 2014), com nível de confiabilidade de moderado a alto entre os registros de ambas as técnicas.

Entretanto, a análise postural é o estudo do posicionamento relacionado às partes do corpo como cabeça, tronco e membros. Em trabalhos estáticos que exigem uma postura parada por longos períodos, naqueles que exigem muita força e nos que exigem posturas desfavoráveis, como o tronco inclinado e torcido, uma postura inadequada pode trazer graves consequências (IIDA, 2005). Segundo Fiedler et al. (2003), as análises posturais ajudam a corrigir esses problemas por meio de treinamentos específicos para a adoção de posturas seguras, saudáveis e confortáveis por parte dos trabalhadores.

O método OWAS (Ovako Working Posture Analysing System) é uma das técnicas que podem ser aplicadas nas análises de postura, já que antecipa os riscos e sugere os pontos críticos em que deve ser realizada a reorganização ergonômica das atividades (VOSNIAK et al., 2011).

Análises do conforto térmico dos trabalhadores, em ambientes que podem ser termicamente estressantes, como as unidades de processamento úmido de café com

secagem mecânica, somadas às exigências físicas do processo, são necessárias para procurar melhorá-los. A sobrecarga térmica varia de uma atividade para outra, em função da atividade metabólica e do esforço físico implicado no trabalho (CARVALHO, 2009). A quantidade de calor gerada aumenta à medida que aumenta a quantidade de atividade física (TODD; VALLERON, 2015).

O uso do Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG) foi estabelecido para avaliar o desempenho humano no trabalho em condições de exposição ao calor (COLOMBIA, 1979; INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO, 1982; BRASIL, 2011), indicando inclusive os parâmetros para seu cálculo, bem como os seus limites. O IBUTG funciona como um indicador que considera a temperatura do ar, o metabolismo, o calor radiante, a velocidade e a umidade relativa do ar como os principais geradores da sobrecarga térmica (COUTO, 1995).

Com relação à influência das condições ambientais nas unidades para processamento úmido de café na Colômbia, no tocante à qualidade do grão, é necessário considerar que dentro dessas instalações é possível encontrar zonas destinadas à armazenagem do café, já que que produtores afastados frequentemente armazenam o café em pergaminho seco por longos períodos antes que seja transportado para os pontos de venda (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016).

Essa situação pode afetar bastante a qualidade do café pergaminho seco, uma vez que ambientes com alta temperatura e umidade durante a armazenagem podem estragar fisicamente os grãos e propiciar sua decomposição (PUERTA QUINTERO, 2008). Temperaturas superiores a 50°C podem “matar” a semente de café e iniciar seu processo de decomposição, enquanto ambientes com umidade relativa do ar entre 70% e 80% geram a aparição de fungos e podem desenvolver acumulação de umidade nos grãos armazenados, e umidades acima de 85% causam proliferação de leveduras e bactérias (NAVARRO; NOYES, 2001).

Segundo Puerta Quintero (2003), as condições adequadas para conservar a qualidade do café pergaminho seco armazenado na Colômbia durante no máximo seis meses, com umidade entre 10% e 12% no grão, consistem de temperatura inferior a 20°C e umidade relativa do ar entre 65% e 70%. Condições ambientais diferentes afetam a qualidade da bebida.

Há poucos estudos com análises do ambiente interno em unidades para processamento úmido de café que incluam propostas de otimização das condições ambientais para a armazenagem do café e para o trabalhador.

O uso de modelagem matemática e computacional para analisar as condições de ambiência e sugerir soluções dentro das construções agroindustriais é cada vez mais frequente e importante (NORTON et al., 2009).

Segundo Bre, Fachinotti e Bearzot (2013), a simulação está se tornando uma ferramenta muito interessante na etapa de design (e avaliação) das construções, porque estas envolvem aspectos muito complexos como fluxos de energia transientes, padrões de ocupação estocásticos, etc., que os métodos de projeto tradicionais baseados na experiência ou experimentação não podem quantificar satisfatoriamente.

A maioria das análises bioclimáticas nas construções rurais tem sido feita com softwares baseados em Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD) (NORTON et al., 2009), a qual é uma abordagem microscópica da modelagem das trocas de calor e massa que permite observar os detalhes do campo de fluxo (FOUCQUIER et al., 2013), mas com enorme demanda de tempo de computação (TAN; GLICKSMAN, 2005). No entanto, existem outros programas, como o EnergyPlusTM, o qual pode fazer uma abordagem simples das condições ambientais dos edifícios, através da chamada técnica multi-zona (também chamado método nodal). É um software de simulação energética e bioclimática para construções muito difundido mundialmente (UNITED STATES, 2012), com código aberto desenvolvido pelo U.S. Department of Energy (DoE). Foi usado por Osório Hernandez et al. (2015, 2016) para analisar a ambiência interna de instalações de processamento úmido de café, obtendo bons resultados.

As afirmações anteriores sugerem que é possível avaliar as condições ambientais em unidades de processamento úmido de café com o fim de gerar propostas de otimização de tais condições tanto para o trabalhador quanto para o café, através de simulações por meio de EnergyPlusTM, complementando com a aplicação do CFD em componentes-chave do edifício.

Esta pesquisa é um dos primeiros estudos sobre ambiência nas unidades de processamento úmido de café, sendo a primeira sobre ergonomia nesse tipo de instalação agroindustrial. Seu desenvolvimento foi baseado em unidades tipológicas que representam a maioria dessas construções na cafeicultura colombiana, considerando tanto as condições do ambiente térmico para o trabalhador e sua ergonomia dentro dessas instalações, quanto o ambiente térmico para o café, principalmente na parte de armazenamento, na busca de um ambiente onde trabalhador e café possam coexistir adequadamente.

Considerando que o Brasil é o maior produtor de café do mundo, que o processamento de café por via úmida vem aumentando em toda a zona cafeicultora do País, tanto para o café arábica quanto para o robusta, e ainda o fato de que o Brasil, assim como a Colômbia, é país de clima quente, fica claro que a metodologia investigativa proposta nesta pesquisa, bem como os seus resultados, possivelmente poderão ser aplicáveis à realidade brasileira e da América Latina, sobretudo no caso das pequenas propriedades ou em se tratando da produção de cafés especiais e artesanais do Brasil, cujo processamento e beneficiamento são muito semelhantes ao praticado na Colômbia, país este conhecido por produzir os melhores cafés do mundo – qualidade essa decorrente da forma de beneficiamento destes últimos cafés.

Esta pesquisa teve como objetivos avaliar e otimizar a ambiência e bem-estar em unidades de processamento de café por via úmida, através de modificações dessas instalações, apresentadas com base nas análises das condições existentes tanto para o café quanto para os operários.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Reymar Coutinho de. **Tendência do processamento pós-colheita de café arábica no Brasil**. Pinhalense Máquinas Agrícolas, 2010.

BRASIL. **Norma Regulamentadora 15, de 08 de dezembro de 2011**. Regulamenta as atividades e operações insalubres. Brasília, DF, 2011.

BRE, F.; FACHINOTTI, V.D.; BEARZOT, G. Mecânica computacional. **Heat and Mass Transfer (A)**, v. 32, n. 37, 2013.

CARVALHO, Cinara da Cunha Siqueira. **Avaliação ergonômica em operações do sistema produtivo de carne de frango**. 2009. 163 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2009.

CARVALHO, C. da C. Siqueira et al. Segurança, saúde e ergonomia de trabalhadores em galpões de frangos de corte equipados com diferentes sistemas de abastecimento de ração. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 438-447, 2011.

COLOMBIA. Ministério de Trabajo y Seguridad Social de Colombia. **Resolución 2400 de 1979**. Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. 1979.

COUTO, H. de A. **Ergonomia aplicada ao trabalho**: o manual técnico da máquina humana. Belo Horizonte, MG: Ergo, 1995. v. 1, 353 p.

ENERGYPLUS. **The reference to EnergyPlus calculations**. Champaign, IL: University of Illinois, 2012. 847 p.

EVANGELISTA, Wemerton Luís. **Análise ergonômica do trabalho em um frigorífico típico da indústria suinícola do Brasil**. 2011. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

FEDERACIÓN NACIONAL DE CAFETEROS DE COLOMBIA – FNC. **About coffee much more than a drink social impact**. Disponível em: <http://www.cafedecolombia.com/particulares/en/sobre_el_cafe/mucho_mas_que_una_bebida/impacto_social/>. Acesso em: 07 set. 2016.

FIEDLER, N.C. et al. Avaliação biomecânica dos trabalhadores em marcenarias no Distrito Federal. **Ciência Florestal**, v. 13, n. 2, p. 99-109, 2003.

FOUCQUIER, A. et al. State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 272-288, 2013.

GIOMO, G.S. Uma para qualidade é segredo. **A Lavoura**, p. 12-21, 2012.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: projeto e produção**. 2.ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2005.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. **Total production by all exporting countries**. London, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 7243 - hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (wet bulb globe temperature)**. Geneva, Suíça, 1982.

MAIA, L.R.; RODRIGUES, L.B. Saúde e segurança no ambiente rural: uma análise das condições de trabalho em um setor de ordenha. **Ciência Rural**, v. 42, n. 6, 2012.

MAIA, L.R.; FERRAZ, S.P.; RODRIGUES, L.B. Assessment of working conditions in an animal feed mill. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 24, n. 2, p. 147, 2016.

MARTÍNEZ, J.A.C.; CUBILLOS, A. Uso de la frecuencia del pulso en la estimación de la carga de trabajo: evaluación de una actividad de movilización de cargas. **Ciencias de la Salud**, v. 12, n. 4, p. 27-43, 2014.

MOURA, R.A. Caracterización del ambiente térmico laboral y su relación con la salud de los trabajadores expuestos. In: CONVENCION SALUD 2015. **Anales...** Disponível em: <<http://www.convencionsalud2015.sld.cu/index.php/convencionsalud/2015/paper/viewPaper/1450>>. Acesso em: 06 set. 2016.

NAVARRO, S.; NOYES, R.T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

NORTON, T. et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 1, p. 78-99, 2009.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of a thermal environment in two buildings for the wet processing of coffee. **DYNA**, v. 82, n. 194, p. 214-220, 2015.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of the internal environment of a post-harvest installation and a solar dryer of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 163-168, 2016.

PALACIN, J.J.F. et al. Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v. 17, n. 3, p. 244-258, 2009.

PUERTA QUINTERO, G.I. Especificaciones de origen y buena calidad del café de Colombia. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 316, p. 1-8, 2003.

PUERTA QUINTERO, G.I. Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 371, p. 1-8, 2008.

TAN, G.; GLICKSMAN, L.R. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 10, p. 1049-1057, 2005.

TODD, N.; VALLERON, A.J. Space-time covariation of mortality with temperature: a systematic study of deaths in France, 1968-2009. **Environmental Health Perspectives**, v. 123, n. 7, p. 659, 2015.

VOSNIAK, J. et al. Avaliação da postura de trabalhadores nas atividades de plantio e adubação em florestas plantadas. **Revista Ceres**, v. 58, n. 5, p. 584-592, 2011.

CAPÍTULO 1 – CARACTERIZAÇÃO DE TIPOLOGIAS ARQUITETÔNICAS DE UNIDADES PARA PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ

RESUMO: O objetivo deste trabalho foi caracterizar tipologias arquitetônicas das unidades de processamento úmido de café, representativas da cafeicultura de Antioquia, Colômbia. Segundo as características arquitetônicas de uma amostra de 3900 projetos, foi determinado que há três unidades de processamento de café por via úmida representativas do estado de Antioquia, para propriedades de produção de porte médio. Foi selecionada uma de cada, a fim de verificar localizações, plantas arquitetônicas e cortes delas *in loco*, para depois digitalizar e analisar as informações. O estudo permitiu estabelecer três tipologias arquitetônicas dessas instalações: tipologia 1, correspondente a um prisma retangular com chaminé e moega superiores; tipologia 2, constituída por uma planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior; e tipologia 3, conformada por uma planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um dos seus desníveis.

Palavras-chave: Cafeicultura, tipologia arquitetônica, levantamento arquitetônico.

1. INTRODUÇÃO

Na produção de café, o Brasil e a Colômbia ocupam a primeira e a terceira posição no mundo, respectivamente (ICO, 2015). O processamento do café na Colômbia é realizado geralmente por via úmida, enquanto no Brasil esse tipo de processamento vem ganhando força pouco a pouco nos últimos anos (ANDRADE, 2010).

Em se tratando das instalações para pós-colheita de café, as mais estudadas com relação a sua arquitetura e materiais de construção, bem como aos efeitos deles sobre a qualidade do produto, são os secadores solares, principalmente os que manejam cobertura (ROA et al., 1999; BERRUETA-SORIANO et al., 2003; TSEGAYE et al., 2014; OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016).

No tocante às instalações para processamento úmido de café, há publicações que associam cada subprocesso a uma zona específica da construção onde é desenvolvido (ARISTIZÁBAL; DUQUE, 2005), e outras apresentam sugestões para a projeção de elementos de cada subprocesso, os quais se concentram, principalmente, no correspondente a construção, cálculo dos volumes de moegas, tanques de fermentação, canais de classificação e secagem através de secadores solares e de máquinas de secagem (VALENCIA; URIBE, 1976; ROA et al., 1999).

No entanto, estudos sobre a arquitetura das instalações para processamento úmido de café que ressaltem suas características no tocante ao projeto e sua relação direta

com a eficiência do processo, aos materiais utilizados e às relações de ambiência são até agora muito poucos.

Ressaltam-se os estudos de Osório Hernandez et al. (2015, 2016), onde foi avaliado o efeito da variação das áreas de ventilação natural sobre a temperatura e umidade relativa do ar, no interior de instalações para processamento úmido de café na Colômbia. No processo, esses autores fizeram uma descrição das características arquitetônicas da construção, passando por forma do envoltório, dimensões, materiais, orientação, clima local, entre outras, necessárias para simular os efeitos das áreas de ventilação, na busca dos melhores resultados para conservar a qualidade do grão de café.

Não obstante, na literatura há carência de estudos que, com levantamentos arquitetônicos, permitam estabelecer com detalhe as tipologias arquitetônicas das instalações para processamento úmido de café, representativas da cafeicultura da Colômbia.

Neste trabalho teve-se como objetivo realizar um levantamento arquitetônico que permitisse caracterizar tipologias arquitetônicas das unidades para processamento úmido de café, representativas da cafeicultura de Antioquia, Colômbia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Com base em uma amostra de 3.900 projetos arquitetônicos de unidades de processamento úmido de café, construídas nos municípios cafeeiros de Antioquia, na Colômbia, entre 2005 e 2014, fornecidos pela Federação de Cafeeiros, foi determinado que, segundo suas características arquitetônicas, há três unidades de processamento de café por via úmida representativas do local para propriedades de produção de porte médio.

É importante ressaltar que as três unidades de processamento representativas, embora tenham sido extraídas de uma base de dados dos municípios do estado de Antioquia, podem estar presentes em toda a zona cafeeira do centro da Colômbia, uma vez que há condições similares de cultura nos produtores, de clima, topografia, entre outros (PÉREZ RENDÓN; RAMÍREZ BUILES; PEÑA QUIÑONES, 2016; SÁNCHEZ, 2016).

De acordo com Pérez Rendón, Ramírez Builes e Peña Quiñones (2016) e Sánchez (2016), foi selecionada uma unidade de cada uma dessas três unidades representativas, a fim de aprofundar sua caracterização, desde observações e levantamentos em campo. A seleção foi realizada segundo similitudes entre elas no tocante a condições geográficas e bioclimáticas de localização, volume de produção (30

toneladas de café pergaminho ao ano), uso da secagem de tipo mecânico e período de produção máxima entre os meses de outubro e novembro.

Foram realizados levantamentos arquitetônicos *in loco* das três instalações, durante os meses de outubro e novembro de 2016.

Para esse levantamento foram incluídas localizações das instalações, plantas arquitetônicas e cortes que fornecessem dados de orientação, dimensões, altura de pé-direito, tipo de fechamento, presença de forros embaixo da cobertura, tipos de telha, beiral, inclinação, assim como materiais usados na estrutura.

Quanto às medições, foram utilizadas cintas métricas, acompanhadas de fotografias para complementar os dados. As informações levantadas foram organizadas e sintetizadas em planilhas e plantas arquitetônicas, utilizando software CAD 2016.

3. RESULTADOS

A seguir são determinadas as características arquitetônicas das três instalações para processamento úmido de café.

3.1. Instalação para processamento úmido de café no município de Barbosa

A instalação para processamento úmido de café está localizada no município de Barbosa, Antioquia, na Colômbia, especificamente nas coordenadas de 6°24'47.64" norte e 75°20'47.08" oeste, com 1.508 msnm, como se pode observar na Figura 1.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Figura 1 – Localização da instalação para processamento úmido de café, no município de Barbosa.

Com uma planta de forma retangular, esta instalação está orientada em sentido noroeste/sudeste (Figura 1). Como se pode ver na Figura 2, sua cobertura consiste de uma laje com tijolos, suportados por vigotas metálicas e com uma camada de concreto na parte superior. Essa cobertura tem uma chaminé sobre a zona onde se localiza a máquina de secagem de café, além da moega seca, em um lado dela. Tais características fazem com que o volume da construção se assemelhe a um prisma retangular com duas elevações na parte superior.



Figura 2 – Instalação para processamento úmido de café, município de Barbosa, vista nordeste.

Nas Figuras 2 e 3, é possível observar que a instalação é basicamente fechada, com paredes de alvenaria de tijolo furado de 0,15 m de espessura, até uma altura de 2,0 m em todas as suas fachadas, à exceção da área do portão de acesso. Desde a altura de 2,0 m até quase o pé-direito, todas as fachadas estão conformadas por cobogós.



Figura 3 – Instalação para processamento úmido de café, município de Barbosa, vista sul/oeste.

A instalação está constituída de dois andares, onde, na planta baixa, funciona a maior parte do processamento úmido do café, a qual conta com uma largura de 6,0 m e comprimento de 11,0 m (Figuras 4 e 5), enquanto seu pé-direito é de 3,50 m, como se observa nas Figuras 6 e 7. No último andar funciona apenas a recepção do café cereja na moega seca, a qual não possui nenhum tipo de cobertura (Figura 5). Para o acesso ao último andar, a instalação tem escadas de concreto na fachada oeste.

No interior da construção predominam os pisos de concreto à vista, mas o fundo do canal é de classificação hidráulica, e no interior dos tanques de fermentação tem revestimento com azulejo. A estrutura consiste de colunas e vigas de concreto. A máquina de secagem de café é pré-fabricada, com paredes metálicas.

Esta construção pode ser definida como tipologia 1: baseada em um prisma retangular com chaminé e moega superiores.

3.2. Instalação para processamento úmido de café no município de Bello

A instalação para processamento úmido de café está localizada no município de Bello, Antioquia, na Colômbia, perto da área urbana do município, especificamente nas coordenadas de 6°21'42.16" norte e 75°34'44.83" oeste, com 1.698 msnm, conforme se vê na Figura 8.

Como pode se observar nas Figuras 9 e 10, ela faz parte de um conjunto de construções, todas adossadas, que juntas formam um volume irregular, devido em parte à intenção do fazendeiro de construir se adaptando à inclinação e às cotas do terreno.

O conjunto de construções está orientado com uma leve inclinação em sentido noroeste/sul leste (Figura 8).

A instalação para processamento úmido de café, propriamente, tem dimensões de 9,10m por 10,05m em planta, está constituída por dois andares: um para a maior parte do processo de processamento úmido de café, e, sobre este, o andar da moega seca, para a recepção do café cereja, conforme as Figuras 11 e 12, respectivamente.

Esta construção pode ser definida como tipologia 2: com planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior.

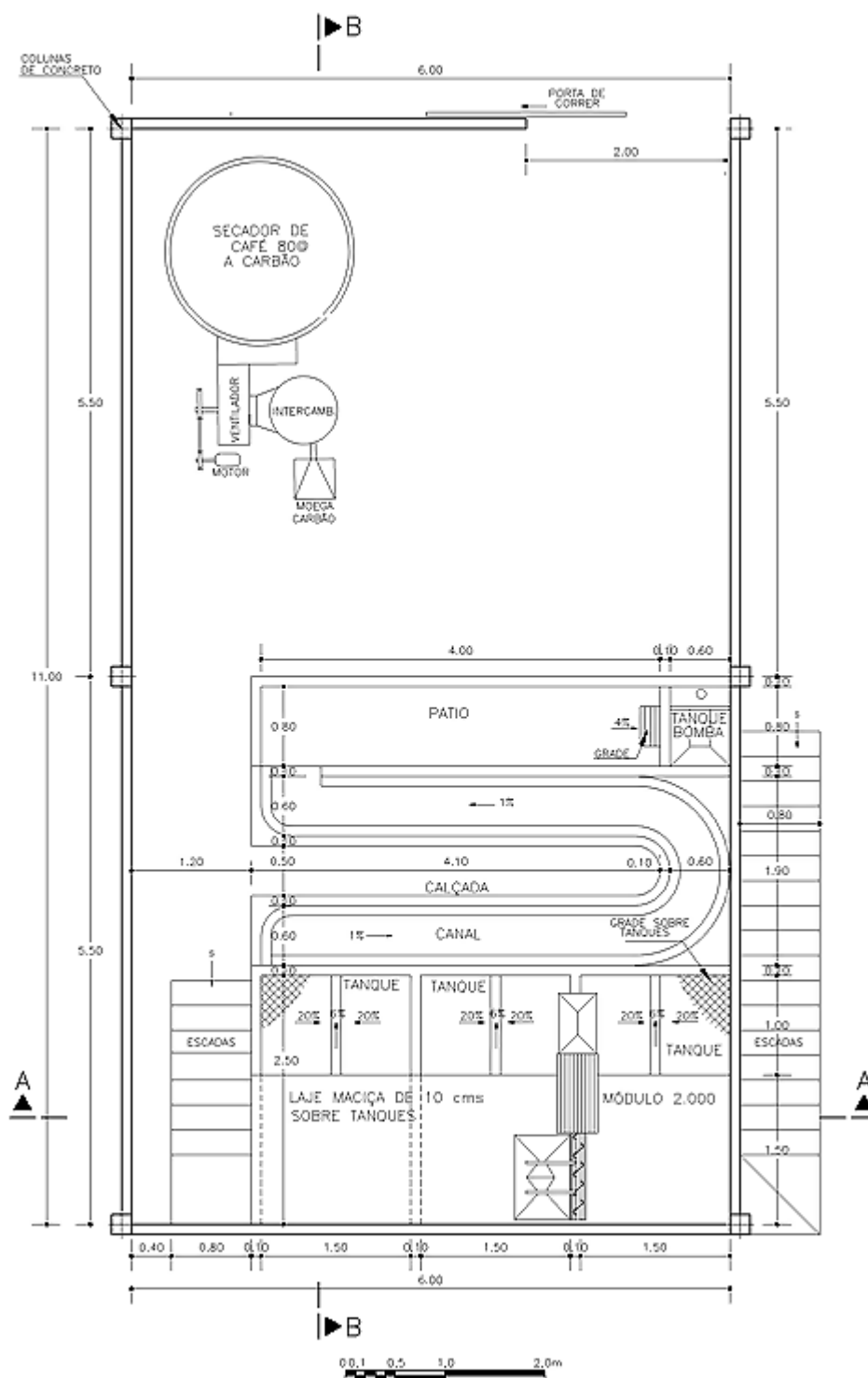


Figura 4 – Planta baixa da instalação para processamento úmido de café, no município de Barbosa – tipologia 1.

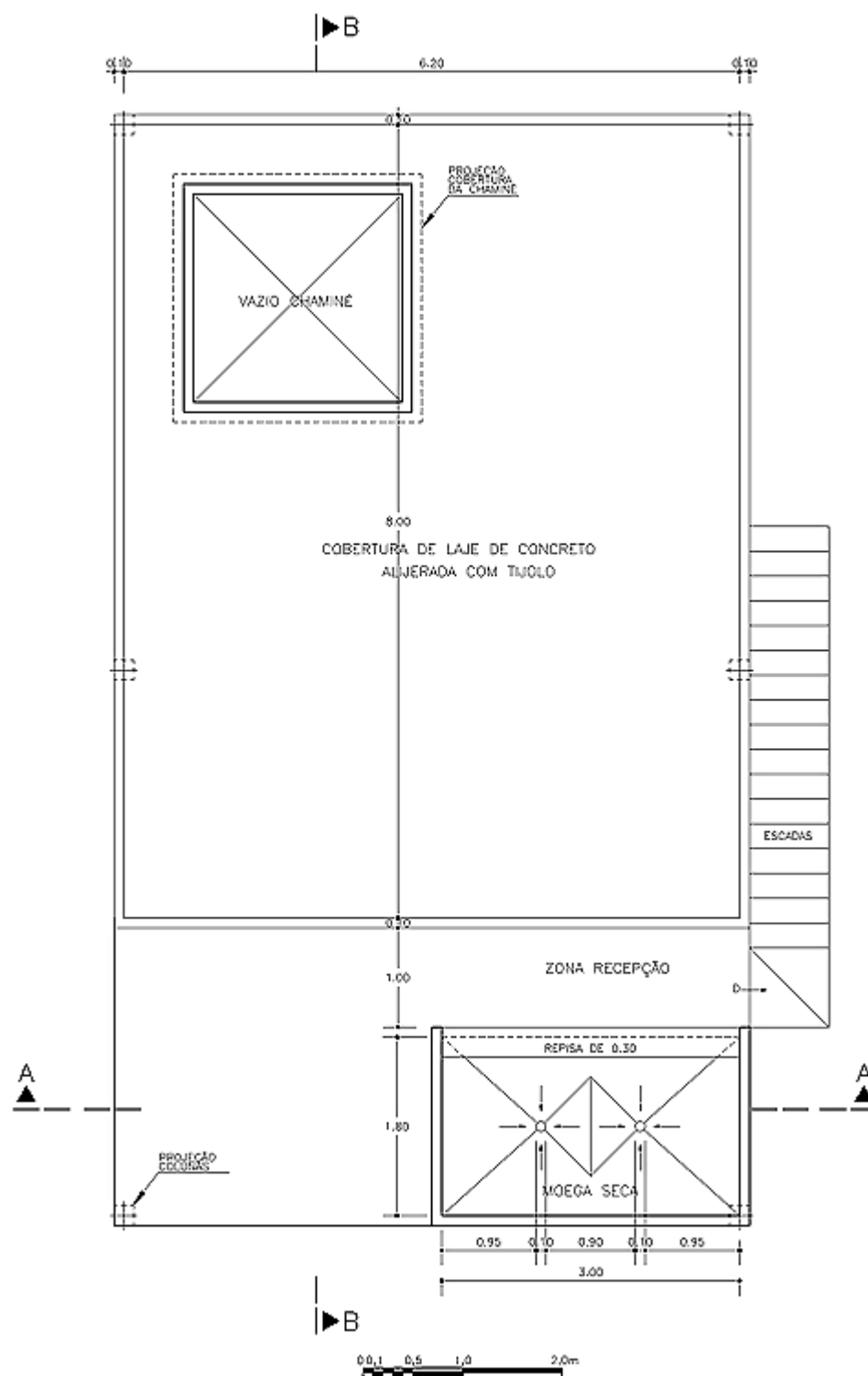


Figura 5 – Planta da moega seca da instalação para processamento úmido de café, no município de Barbosa – tipologia 1.

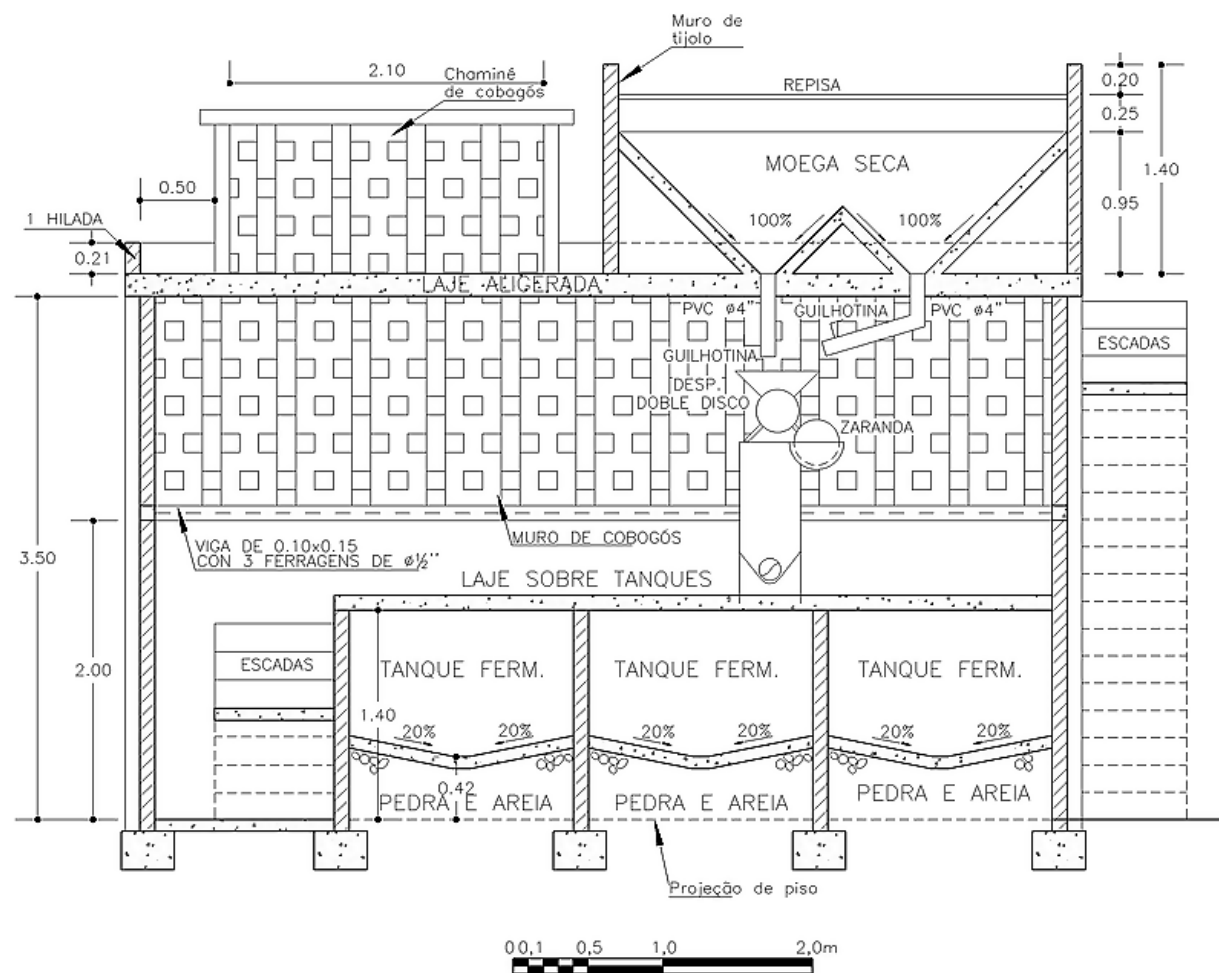


Figura 6 – Corte A-A' da instalação para processamento úmido de café, no município de Barbosa – tipologia 1.

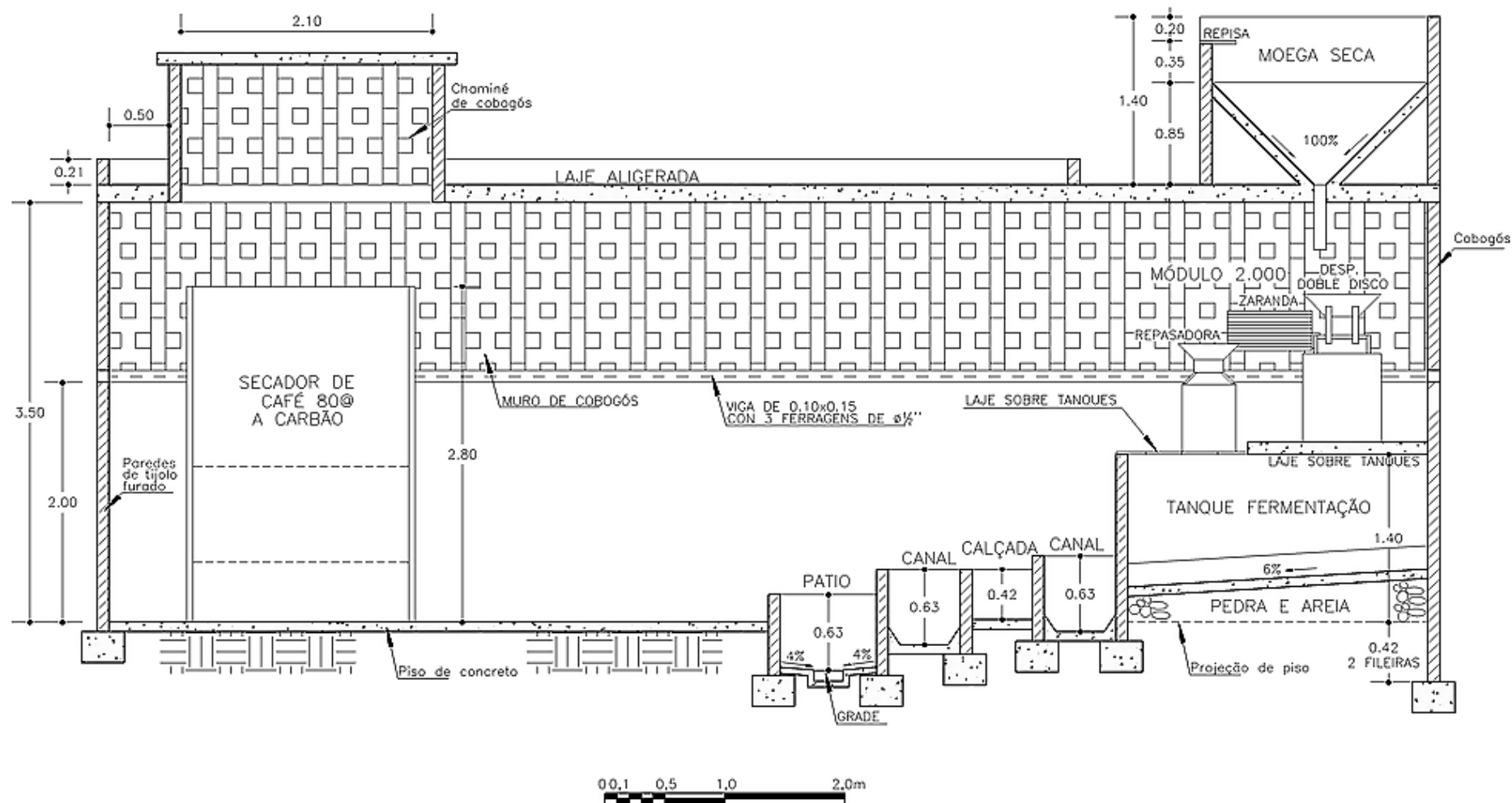


Figura 7 – Corte B-B' da instalação para processamento úmido de café, no município de Barbosa – tipologia 1.



Fonte: Adaptado de Google Earth (2017).

Figura 8 – Localização da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello.



Figura 9 – Instalação para processamento úmido de café, no município de Bello, vista nordeste.



Figura 10 – Instalação para processamento úmido de café, no município de Bello, vista sul/oeste.

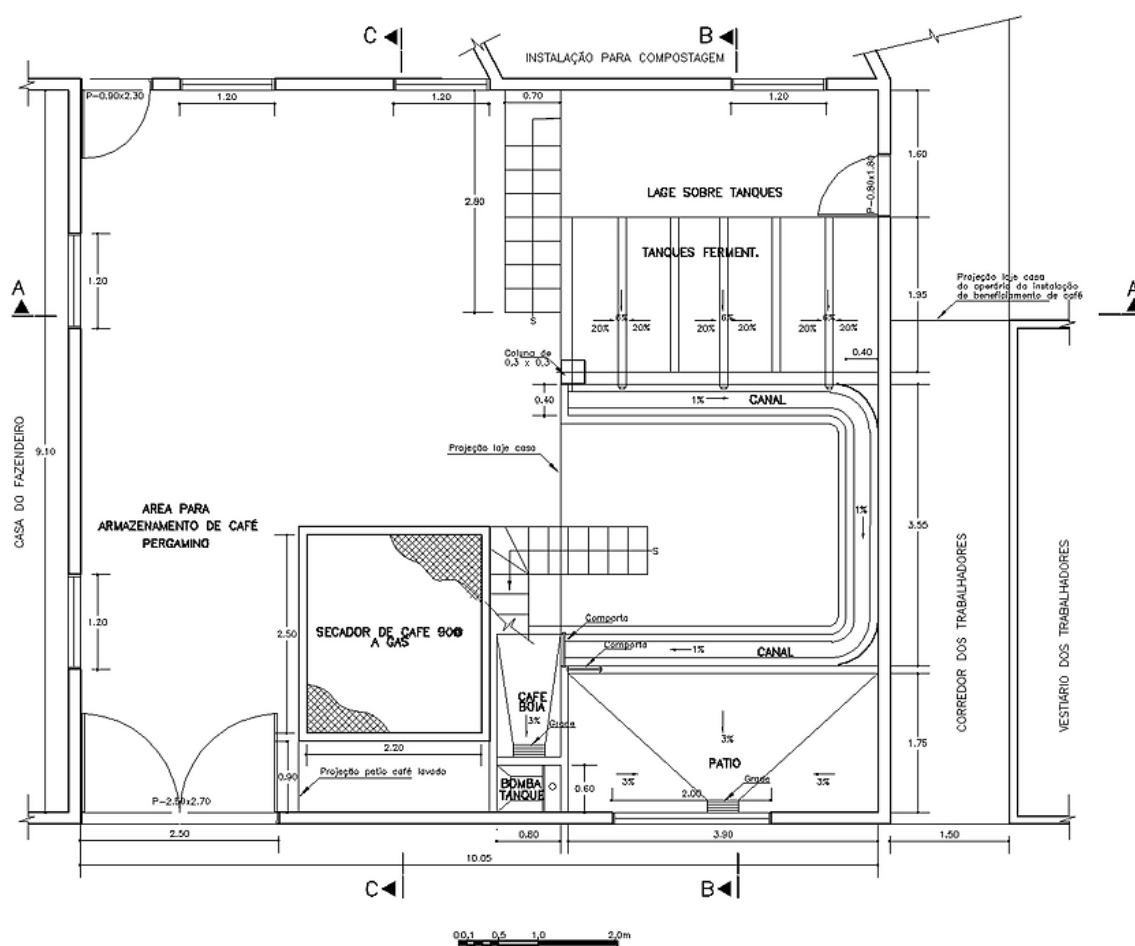


Figura 11 – Planta baixa da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

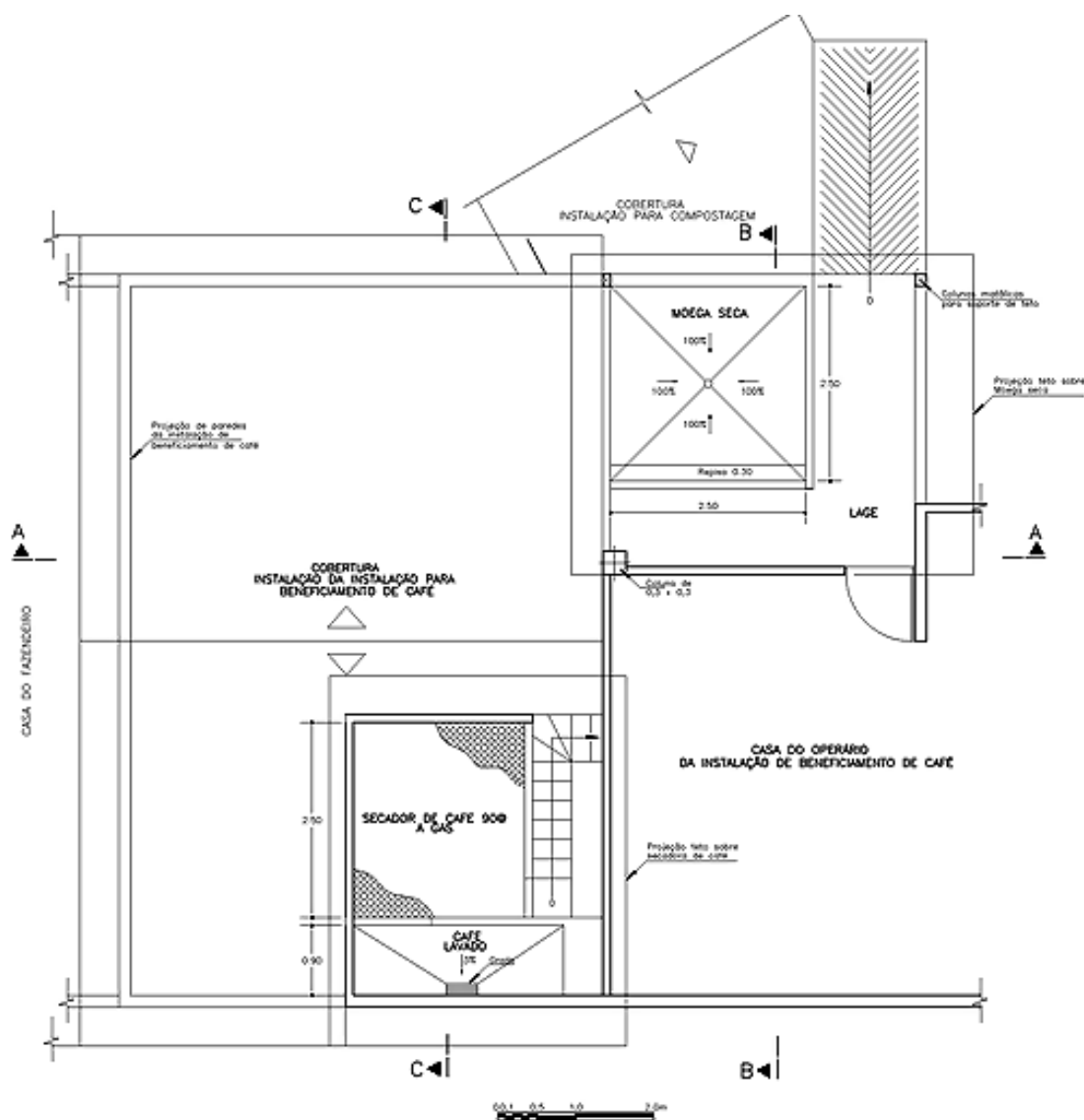


Figura 12 – Planta da moega seca da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

Esta construção está conformada por uma cobertura de laje com tijolos suportados por vigotas de concreto e com uma camada de concreto na parte superior, cobrindo boa parte da área da instalação, que pode ser observado nas Figuras 13, 14 e 15. Sobre essa laje está construída parte da casa do operário da instalação, e há uma área destinada à moega seca, esta última possui um telhado de fibrocimento, apoiado em treliças metálicas.

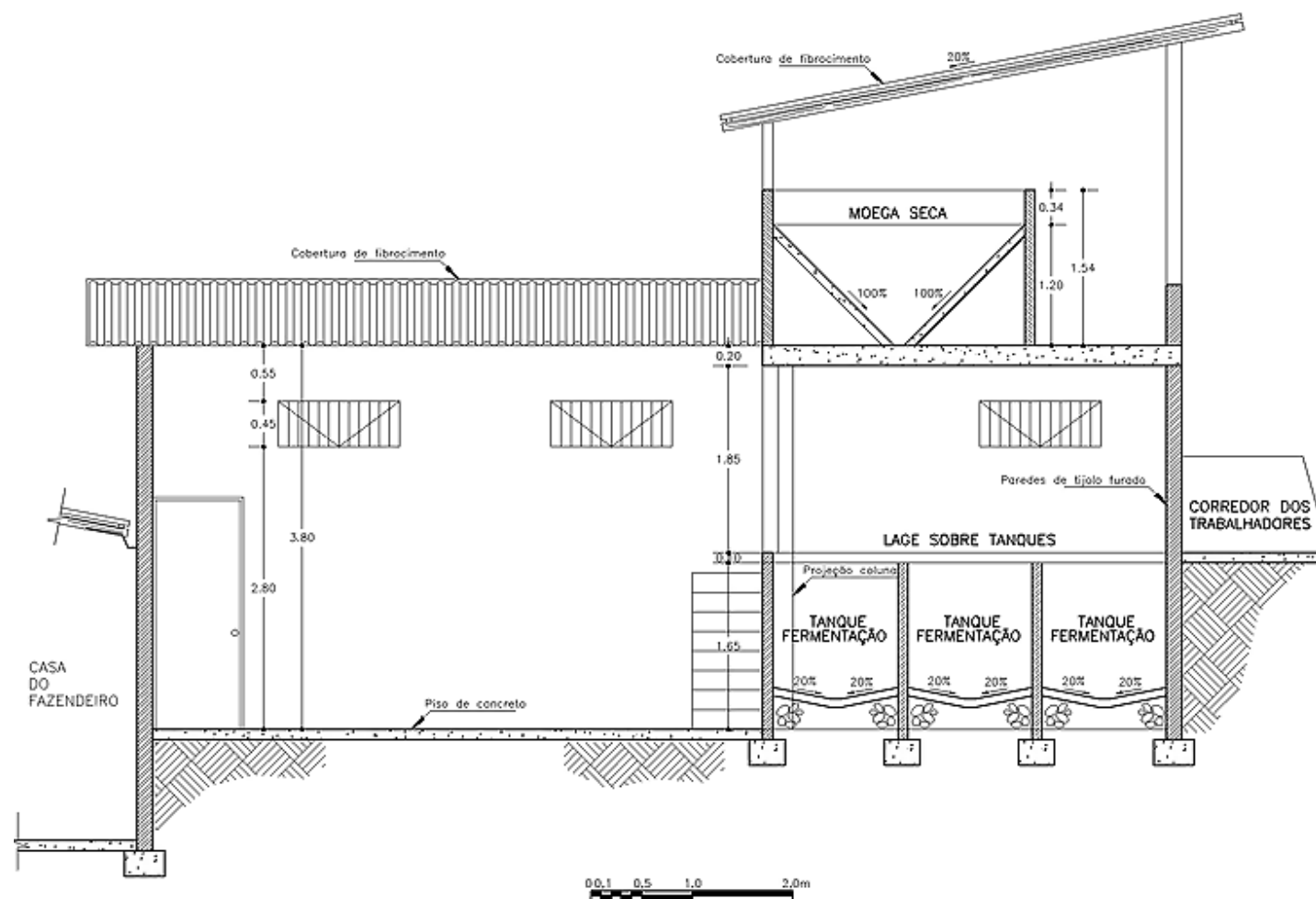


Figura 13 – Corte A-A' da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

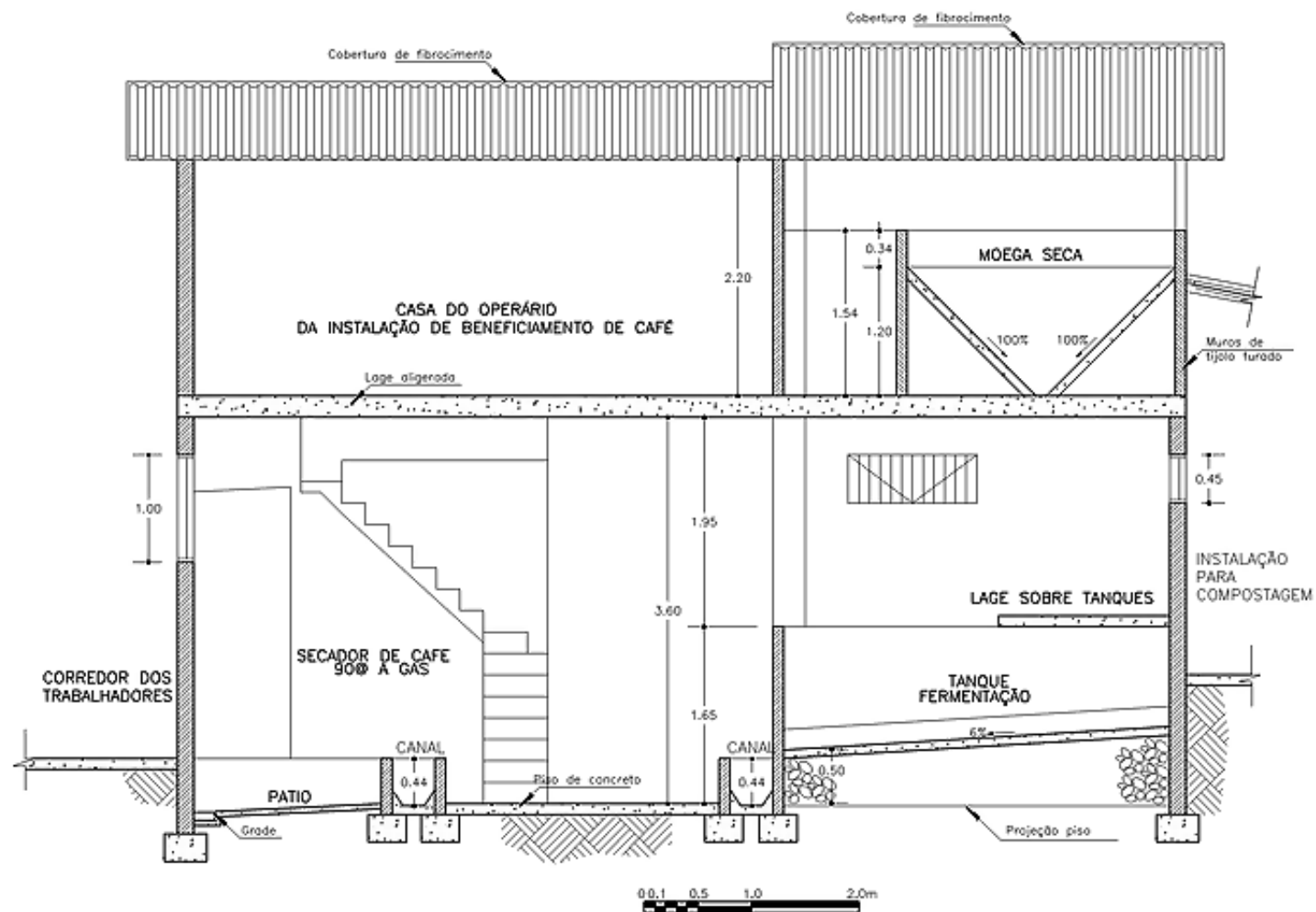


Figura 14 – Corte B-B' da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

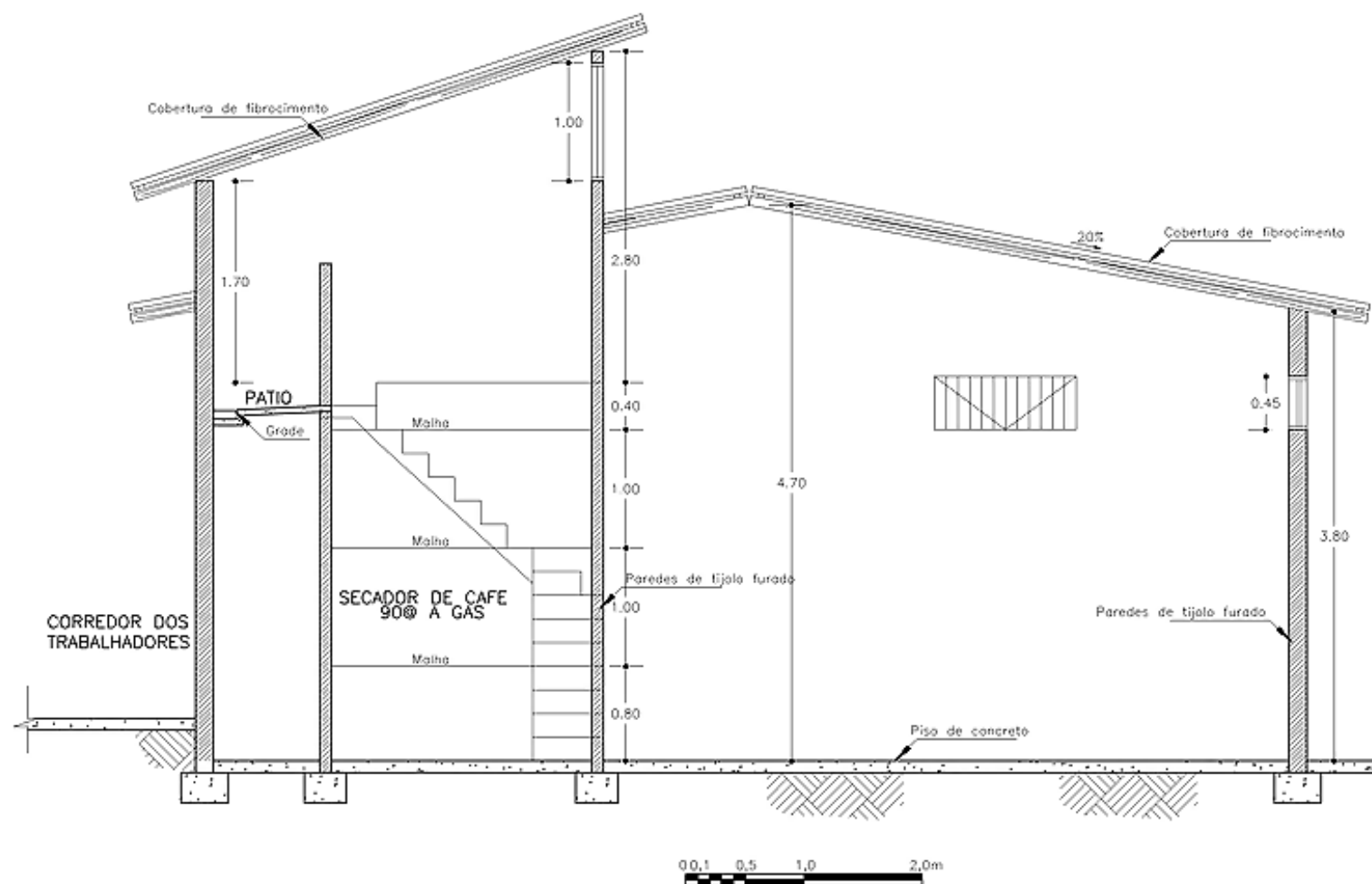


Figura 15 – Corte C-C' da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

Quanto ao resto da instalação, há uma cobertura de fibrocimento, com uma área que sobressai da cobertura, a qual também está coberta, correspondente à zona onde se localiza a máquina de secagem de café, conforme visto na Figura 15.

Pelo fato de possuir diferentes coberturas, esta construção tem duas alturas principais de pé-direito, sendo 3,40 m na zona coberta com laje e 3,80 m na maior zona coberta com fibrocimento.

As paredes da instalação são em sua maioria de alvenaria de tijolo furado de 0,15 m de espessura, com revestimento de argamassa até uma altura de 2,0 m em seu interior. As paredes da máquina de secagem de café também estão construídas com esse tipo de tijolo e contam com o mesmo revestimento por dentro e por fora. As paredes que ligam com o terreno são de blocos de cimento. Os pisos são de concreto à vista, com revestimento de azulejo no fundo do canal de classificação hidráulica e no fundo dos tanques de fermentação (Figuras 16 e 17). A estrutura consiste de colunas e vigas de concreto para confinar paredes e treliças metálicas, a fim de suportar o telhado (Figura 17).



Figura 16 – Tanques de fermentação da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.



Figura 17 – Interior da instalação para processamento úmido de café, no município de Bello – tipologia 2.

Em razão de compartilhar a maior parte dos seus fechamentos com outras instalações, esta construção é fechada. Contudo, a construção tem aberturas na parte superior das paredes, com grelhas, algumas com acesso direto ao ar livre, pelo aproveitamento do desnível com a construção vizinha ou por que ficam na fachada principal, e outras com acesso à zona de compostagem (Figura 17).

3.3. Instalação para processamento úmido de café no município de San Roque

A instalação para processamento úmido de café está localizada no município de San Roque, Antioquia, na Colômbia, perto da zona urbana, especificamente nas coordenadas de 6°29'22.79" norte e 75°00'41.86" oeste, com 1.435 msnm, como se pode observar na Figura 18.

Orientada em sentido nordeste/sul oeste (Figura 18), esta instalação conta com uma planta retangular composta por três desníveis (Figuras 19 e 20), em que o fazendeiro fez dela uma construção escalonada, com o fim de construir se adaptando à inclinação do terreno. O processamento úmido de café começa no nível mais alto da construção e finaliza no nível mais baixo.

Esta construção pode ser definida como tipologia 3: com planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um de seus desníveis.



Fonte: Disponível em: <<https://www.bing.com/maps>>. Acesso em: 22 mar. 2017.

Figura 18 – Localização da instalação para processamento úmido de café na fazenda Jacaranda, no município de San Roque.

A instalação possui dimensão de frente de 5,10 m; no nível mais alto, tem comprimento de 3,65 m e pé-direito de 2,40 m; no nível intermediário, de 4,10 m e pé-direito de 1,90 m; e no nível mais baixo, de 6,80 m aproximadamente e pé-direito de 2,45 m. Seu comprimento total é de 14,52 m.

A comunicação entre o nível mais alto e o nível intermediário é feita por meio de escadas de concreto, revestidas com azulejo; a comunicação deste nível com o mais baixo é realizada através de escadas de madeira com inclinação bastante pronunciada (Figura 21).

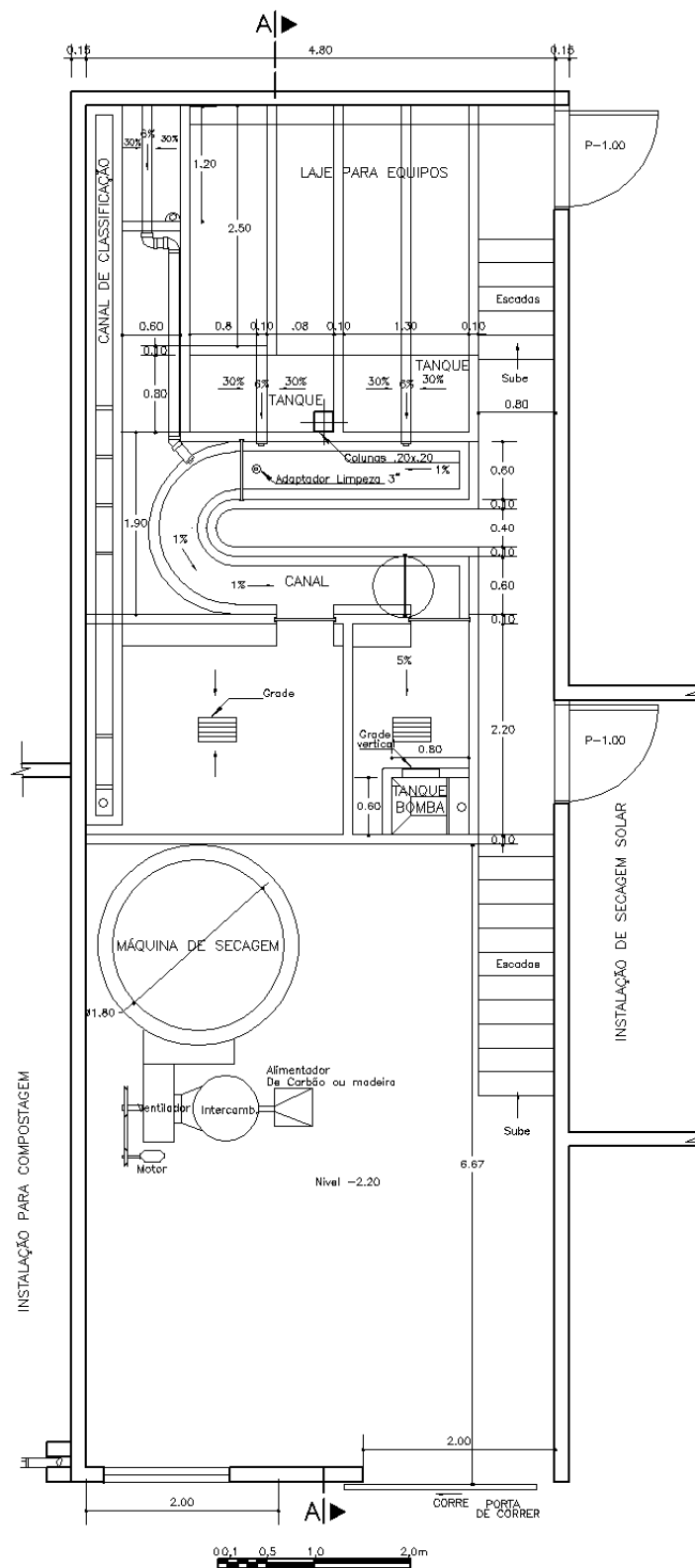


Figura 19 – Planta baixa da instalação para processamento úmido de café, no município de San Roque – tipologia 3.

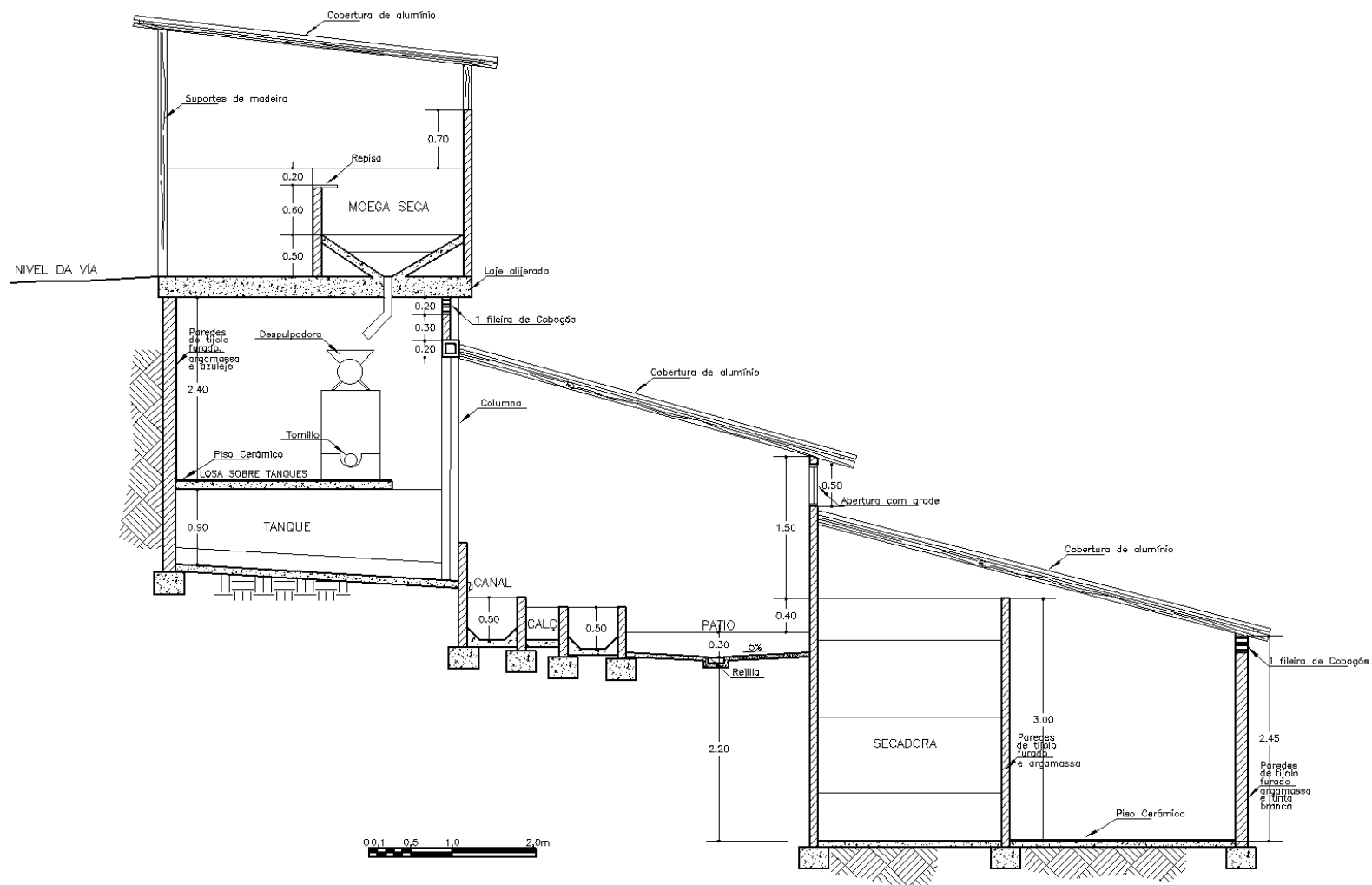


Figura 20 – Corte A-A' da instalação para processamento úmido de café, no município de San Roque – tipologia 3.

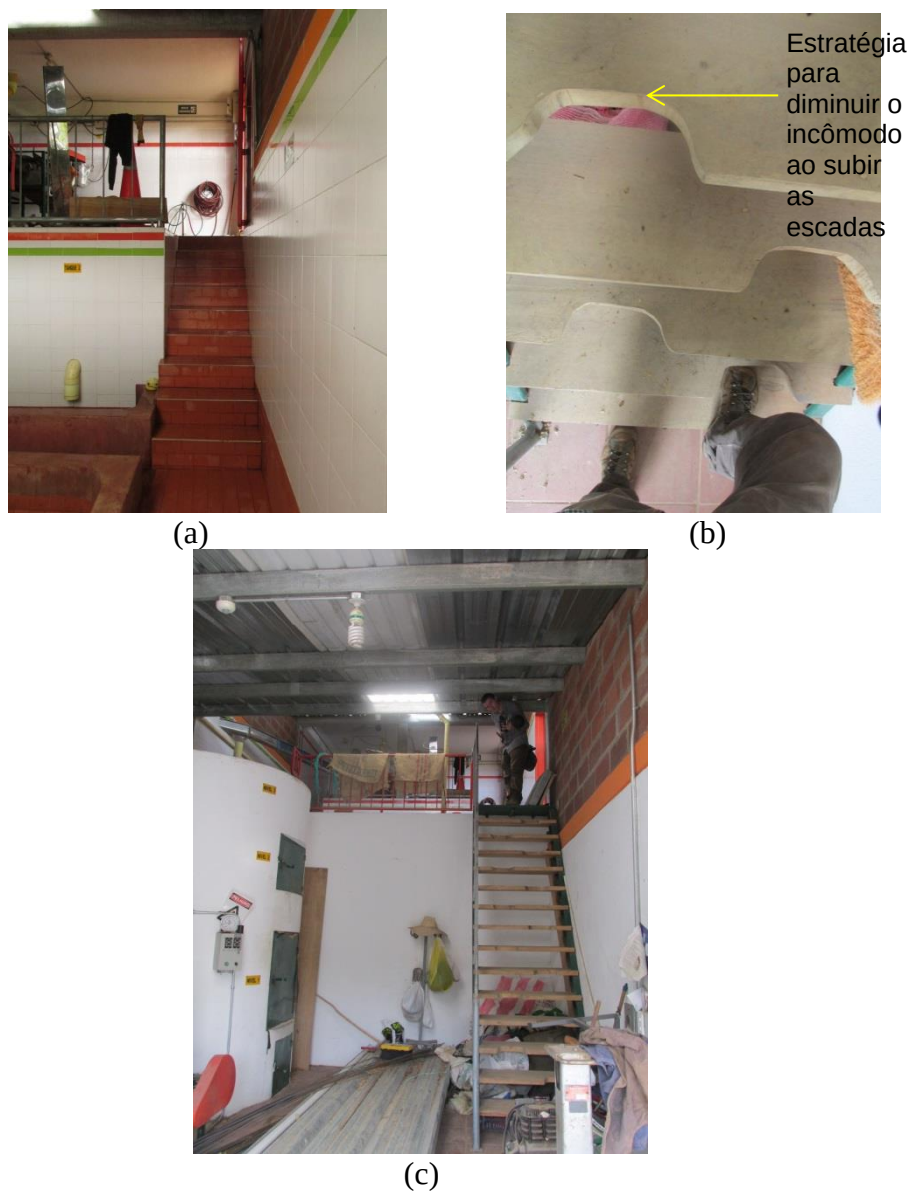


Figura 21 – Escadas de comunicação entre os três níveis da planta baixa da instalação para processamento úmido de café, no município de San Roque – tipologia 3: (a) escadas para descer do nível mais alto ao nível intermediário; (b) e (c) escadas para descer do nível intermediário ao nível mais baixo.

Os dois níveis mais baixos da instalação estão cobertos com telhado de alumínio, suportados por vigotas metálicas, enquanto sobre o nível mais alto existe uma laje de concreto aligeirada com tijolos, que alberga a moega seca para a recepção do café cereja, a qual conta com uma cobertura de alumínio, suportada por pilares e vigotas de madeira, como se observa na Figura 22.



Figura 22 – Coberturas de alumínio na instalação para processamento úmido, no município de San Roque.

Esta construção é basicamente fechada. Nas Figuras 23 e 24 pode-se ver que conta apenas com uma abertura com cobogós no desnível da laje que cobre o nível mais alto e a cobertura do nível intermediário, e uma abertura com grelha no desnível das coberturas do nível intermediário e o mais baixo, além das aberturas que conformam a porta de acesso no nível mais alto e o portão do nível mais baixo. A estrutura consiste de colunas e vigas de concreto.

A instalação está construída com base em alvenaria de tijolo furado de 0,15 m de espessura. Nos dois níveis mais altos, quase 90% das paredes, pisos, tanques de fermentação, canais de classificação hidráulica e o resto das áreas onde se realiza o processamento úmido de café têm revestimento de azulejo, como se pode ver nas Figuras 23 e 24. As paredes restantes nos níveis mais altos têm tijolo à vista ou tijolo com uma camada de argamassa pintada de branco.



Figura 23 – Revestimentos das superfícies no nível mais alto da instalação para processamento úmido de café, no município de San Roque – tipologia 3.

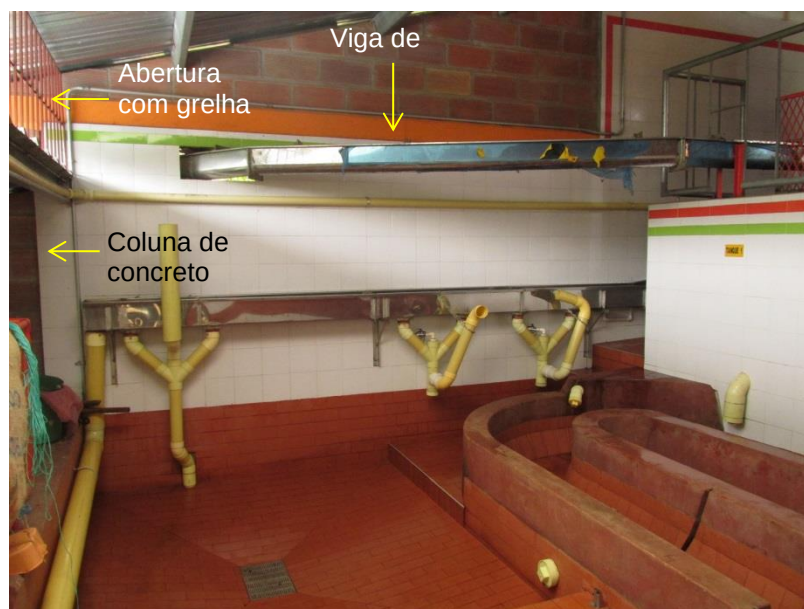


Figura 24 – Revestimentos das superfícies no nível intermediário da instalação para processamento úmido de café no município de San Roque – tipologia 3.

Quanto ao nível mais baixo, os pisos estão revestidos com azulejo, e as paredes têm tijolo com uma camada de argamassa pintada de branco (Figura 25). Nesta figura pode-se observar que a máquina de secagem de café está construída com tijolo, revestida com uma camada de argamassa dentro e fora dela, e pintada de branco na superfície externa.



Figura 25 – Revestimentos das superfícies no nível mais baixo da instalação para processamento úmido de café, no município de San Roque – tipologia 3.

4. CONCLUSÕES

A partir da diferença na forma arquitetônica das instalações estudadas, foi possível caracterizar três tipologias arquitetônicas das unidades para processamento úmido de café, representativas do estado de Antioquia, que faz parte da zona cafeeira colombiana.

As tipologias de unidades de processamento úmido de café foram determinadas como tipologia 1: prisma retangular com chaminé e moega superiores; tipologia 2: planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior; e tipologia 3: planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um de seus desníveis.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, Reymar Coutinho de. **Tendência do processamento pós-colheita de café arábica no Brasil**. Pinhalense Máquinas Agrícolas, 2010.

ARISTIZÁBAL A., C.; DUQUE O., H. Caracterización del proceso de beneficio de café en cinco departamentos cafeteros de Colombia. **Cenicafé (Colombia)**, v. 56, n. 4, p. 299-318, 2005.

BERRUETA-SORIANO, V.M. et al. Participación campesina en el diseño y construcción de un secador solar para café. **Agrociencia**, v. 37, n. 1, p. 96, 2003.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. **Total production by all exporting countries**. London, 2015.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of a thermal environment in two buildings for the wet processing of coffee. **DYNA**, v. 82, n. 194, p. 214-220, 2015.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of the internal environment of a post-harvest installation and a solar dryer of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 163-168, 2016.

PÉREZ RENDÓN, E.P.; RAMÍREZ BUILES, V.H.; PEÑA QUIÑONES, A.J. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. **Investigaciones Geográficas**, n. 89, p. 23-40, 2016.

ROA, M. et al. **Beneficio ecológico del café**. Centro Nacional de Investigaciones del Café, 1999. Disponível em: <<http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=IICANI.xis&method=post&formato=2&cantidad=1&expresion=mfn=000077>>. Acesso em: 19 abr. 2017.

SÁNCHEZ, L.M. La contabilidad en la conservación del paisaje cultural cafetero: retos y posibilidades. **Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**, v. 8, p. 57-70, 2016.

TSEGAYE, B. et al. The influence of sun drying methods and layer thickness on the quality of lowland arabica coffee varieties at Gomma I, Southwestern Ethiopia. **Research Journal of Agriculture and Environmental Management**, v. 3, n. 11, p. 547-554, 2014.

VALENCIA, A.; URIBE, A. Normas para el diseño de beneficiaderos de café. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 58, p. 1-4, 1976.

CAPÍTULO 2 – AVALIAÇÃO ERGONÔMICA EM UNIDADES TIPOLÓGICAS DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ NA COLÔMBIA

RESUMO: Neste capítulo teve-se como objetivo avaliar ergonomicamente as atividades dos trabalhadores, dentro de três unidades tipológicas de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia. A ergonomia foi avaliada sob dois aspectos: a carga física de trabalho, onde foi aplicada a técnica da Frequência de Pulso (FP) complementada com a Técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC), para a análise; e a análise das posturas assumidas durante a jornada de trabalho, através do sistema OWAS. Nenhuma das três tipologias esteve nas categorias que representam perigo para a saúde dos trabalhadores, na análise da carga física de trabalho das atividades desenvolvidas, porém a tipologia 1 apresentou os menores esforços, principalmente pela automação das atividades relacionadas com a máquina de secagem. Na análise postural, os maiores riscos ergonômicos foram encontrados nas tarefas manuais, em que as tipologias 1 e 2 são destacadas nas atividades de despulpamento, lavagem e classificação hidráulica, e a tipologia 3 se destaca pela alimentação do combustível da secadora e embalagem do café. Entretanto, atividades automáticas na tipologia 1, como as fases de secagem e embalagem, e na tipologia 3, como a lavagem e a classificação hidráulica, geraram os menores riscos ergonômicos das três tipologias avaliadas. Foram recomendados treinamentos para adoção de posturas seguras, alternância de trabalho entre vários operários, pausas dentro dos períodos das atividades e assentos dispostos para isso, conforme sugerido na NR17, como medidas corretivas imediatas. Em médio e longo prazo, foram recomendados automatização dos processos e modificações nas instalações.

Palavras-chave: carga física de trabalho, análise postural, frequência de pulso, frequência cardíaca contínua, método OWAS.

1. INTRODUÇÃO

Na indústria produtora de café no mundo, o Brasil e a Colômbia ocupam a primeira e a terceira posição, respectivamente (ICO, 2015). Na Colômbia, o processamento do café é realizado geralmente por via úmida, técnica que pouco a pouco vai ganhando força no Brasil (ANDRADE, 2010). Essa forma de processamento pode requerer exigências físicas dos trabalhadores que ainda não foram estudadas.

Segundo Maia e Rodrigues (2012) e Maia, Ferraz e Rodrigues (2016), estudos sobre a segurança no trabalho em ambientes rurais são recentes e ainda há falta de informação em avaliações em alguns setores e atividades.

A carga física de trabalho por parte dos trabalhadores tem sido um tema fortemente estudado pela ergonomia e considerado bastante importante para a maioria dos trabalhadores, inclusive para os que atuam em setores mais modernos e com esforços físicos menores (IIDA, 2005). Em estudos ergonômicos é comum encontrar a medição de índices fisiológicos, realizados para determinar o limite de atividade física que o

indivíduo pode exercer. Isso possibilita a reorganização do trabalho, estabelecendo melhores formas de execução, uma duração ótima da jornada de trabalho e a frequência ideal de pausas orientadas (COUTO, 1996).

Legislações como a colombiana e a brasileira exigem do empregador a definição de pausas para repouso e de prevenção da sobrecarga fisiológica, pois são necessárias para preservar a saúde dos trabalhadores (COLOMBIA, 1979; BRASIL, 2011). Segundo o item 17.1.2 da NR-17 (BRASIL, 2007), os empregadores devem fazer um estudo ergonômico nos seus processos de produção.

De acordo com Martínez e Cubillos (2014), no meio industrial são usados métodos práticos com indicadores fisiológicos que permitem calcular a carga física de trabalho associada a uma atividade muscular dinâmica de trabalho. A frequência cardíaca é considerada um desses indicadores. Existem principalmente duas técnicas para estimação e cálculo da frequência cardíaca para determinar a carga física de trabalho: a da Frequência Cardíaca Contínua (FCC) e a da Frequência de Pulso (FP). A primeira teve uso inicialmente na área do esporte, e a segunda foi utilizada no campo da medicina, porém ambas têm sido aplicadas posteriormente em estudos relacionados com ergonomia e outros campos de investigação (CARVALHO et al., 2011; EVANGELISTA, 2011; MARTÍNEZ; CUBILLOS, 2014).

Tem sido observado um nível de confiabilidade de moderada a alta entre os registros da técnica FP e os da técnica FCC (MARTÍNEZ; CUBILLOS, 2014).

1.1. Técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC)

Nesta técnica é registrada a frequência cardíaca de forma contínua, utilizando um cinto torácico que registra os batimentos do coração a partir de eletrodos precordiais, em intervalos de tempo determinado, armazenando os dados dentro de uma memória.

A FCC foi a técnica utilizada por Carvalho et al. (2011) para avaliar fatores ergonômicos dos trabalhadores dos processos de incubação, criação e abate de frangos de corte, com relação à sobrecarga física, com o fim de orientar o estabelecimento de melhoria das condições de trabalho.

Ela também foi utilizada por Evangelista (2011) que fez uma análise ergonômica do trabalho em uma indústria frigorífica de suínos, típica do Brasil, nos processos de recepção de suínos, abate, desossa, embalagens, cortes especiais e expedição. Dentro da análise ergonômica, o autor avaliou a carga física de trabalho e fez propostas para minimizar e, ou, eliminar riscos diagnosticados.

Na técnica da FCC, o limite de carga máxima no trabalho pode ser calculado de forma indireta com base na Frequência Cardíaca do Trabalho (FCT) ou na Carga Cardiovascular (CCV).

O limite de aumento da frequência cardíaca durante o trabalho, aceitável para um "desempenho" contínuo, é de 35 bpm para os homens e de 30 bpm para as mulheres, o que quer dizer que, quando a frequência cardíaca do trabalho estiver 35 ou 30 bpm acima da frequência cardíaca média de repouso (FCR), o limite é atingido (KROEMER; GRANDJEAN, 2005).

A carga cardiovascular corresponde à porcentagem da frequência cardíaca do trabalho (FCT), em relação à frequência cardíaca máxima utilizável (FCM), que não deve ultrapassar 40% da frequência cardíaca do trabalho (APUD et al., 1989).

1.2. Técnica da Frequência de Pulso (FP)

Nesta técnica é realizado o registro da frequência cardíaca com o nome de frequência do pulso. Os dados são registrados nos minutos imediatamente depois de finalizada uma tarefa. É considerada uma técnica não invasiva de medição fisiológica, já que precisa unicamente de um cronômetro para seu registro (MARTÍNEZ; CUBILLOS, 2014).

Ela foi utilizada por Martínez e Cubillos (2014), com o fim de estimar a carga física de trabalho, de pessoal em condições de laboratório, em uma atividade de manipulação de carga entre 17,5 e 25 kg, nas situações de levantar, transportar e depositar a carga, antes, durante e depois da atividade. O trabalho permitiu avaliar a eficácia do método da FP na determinação da carga física de trabalho, como base para a aplicação de medidas de melhoria na organização do trabalho.

Na análise da FP é considerada a média da frequência de pulso durante o trabalho (FPm); a Ts, que é o somatório dos tempos efetivos de execução da atividade durante a jornada de trabalho; o Pr, que é a média do pulso de repouso; e o Pw, que é o pulso médio durante a jornada de trabalho.

Segundo o observado na teoria, dentro das diferenças que podem ser encontradas entre ambas as técnicas, além do método de coleta de dados, está o fato de que, para classificar a carga física de trabalho, no proposto por (ROSENBLAT, 1975) para a FP, deve-se fazer um balanço geral da frequência de pulso nas atividades da jornada completa, enquanto na FCC é possível analisar a frequência cardíaca para cada atividade.

Entre os estudos ergonômicos empregados em atividades laborais, e que ainda não tem sido aplicado na indústria do café, especificamente no seu processamento, está a análise postural, a qual para Iida (2005), é o estudo do posicionamento relacionado às partes do corpo, como cabeça, tronco e membros. Segundo esse autor, a boa postura é importante para a realização do trabalho sem desconforto e estresse.

Projetos com problemas de ergonomia nas instalações agroindustriais, relacionados com postos de trabalho, máquinas e equipamentos, assim como com as exigências próprias das tarefas, com frequência obrigam o trabalhador a assumir posturas consideradas inadequadas.

Para Iida (2005), existem principalmente três situações em que uma postura inadequada pode trazer graves consequências:

- Trabalhos estáticos que involucram uma postura parada por longos períodos.
- Trabalhos que exigem muita força.
- Trabalhos que exigem posturas desfavoráveis, como o tronco inclinado e torcido.

Nos últimos anos, as Lesões por Esforço Repetitivo/Distúrbios Osteomusculares Relacionados ao Trabalho (LER/Dort) têm sido consideradas dentro dos principais grupos de doenças relacionadas ao trabalho (OLIVEIRA, 2001; CARDOSO JUNIOR, 2006). Segundo esses mesmos autores, as LER/Dort são um fenômeno relacionado ao trabalho, o qual tem a ver com a ocorrência de vários sintomas, concomitantes ou não, como dor, parestesia, sensação de peso, fadiga, e também se caracteriza por aparecimento insidioso geralmente nos membros superiores, pescoço e, ou, membros. Tais sintomas geram incapacidade laboral temporária ou permanente, resultado da utilização extrema das estruturas anatômicas do sistema musculoesquelético e da falta de tempo de sua recuperação.

Dentro das técnicas para a avaliação do desempenho postural do ser humano no trabalho, existem os chamados métodos baseados em observação. Dois destes métodos bastante conhecidos são o método REBA (Rapid Entire Body Assessment) e o método OWAS (Ovako Working Posture Analysing System).

O método REBA analisa com muitos detalhes o conjunto de posições adotadas pelos membros superiores do corpo para realizar tarefas (braço, antebraço e pulso), do tronco, pescoço e pernas. Além disso, considera a força necessária e a forma em que é acoplada a mão ou o corpo à carga. Permite avaliar posturas estáticas e dinâmicas e pode identificar mudanças súbitas de postura ou posturas instáveis. Para cada postura de cada membro tem uma pontuação, mesmo para a carga e o acoplamento do corpo a ela. Um

cálculo dessas pontuações gera o resultado final, que pode indicar os níveis de risco ergonômico e as medidas de ação (GONZALES et al., 2017).

Entretanto, o método OWAS antecipa os riscos e sugere os pontos críticos em que deve ser realizada a reorganização ergonômica das atividades (VOSNIAK et al., 2011). Este método foi desenvolvido pela Ovako Ou e o Instituto Finlandês de Saúde Ocupacional, para analisar as posturas de trabalho na indústria do aço. Esta técnica, segundo Iida (2005), consiste de um sistema de registro em que cada postura é descrita por um código de seis dígitos, onde cada código representa as posições do dorso, braços, pernas, e carga.

De acordo com a avaliação dessas posturas, elas são ainda classificadas através do método em quatro categorias. Desse modo, este método produz normas e recomendações para estabelecer limites posturais na realização do trabalho (VOSNIAK et al., 2011), cujos resultados têm alto nível de confiabilidade (DE BRUIJN; ENGELS; VAN DER GULDEN, 1998).

O significado e condições de enquadramento de cada postura, assim como as diferentes categorias em que podem ser classificadas as posturas assumidas pelos trabalhadores durante a jornada laboral, através do método OWAS, são explicados com mais detalhes na seção de Material e Métodos da análise postural.

O método OWAS tem sido aplicado na indústria com atividades que implicam cargas pesadas e posturas complicadas (SILVA, 2001; CARVALHO et al., 2011; EVANGELISTA, 2011). Estes dois últimos autores o aplicaram na agroindústria, analisando e classificando as posturas de trabalhadores em galpões avícolas, e em uma indústria frigorífica de suínos, respectivamente, a partir de registros fotográficos, sem uma frequência de captura predefinida.

Embora a ergonomia seja de grande importância na saúde dos trabalhadores e possa influir no desenvolvimento adequado das atividades laborais na agroindústria, não há estudos reportados na literatura sobre esse tema dentro de unidades tipológicas de processamento úmido de café. Neste trabalho objetivou-se fazer uma avaliação ergonômica das atividades dos trabalhadores dentro de três unidades tipológicas de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia.

2. MATERIAL E MÉTODOS

A avaliação ergonômica das atividades próprias do processamento úmido de café foi realizada nas tipologias de instalação para tal processamento representativas do estado

de Antioquia, na Colômbia, descritas no capítulo 1 da presente pesquisa, sendo a tipologia 1 constituída por um prisma retangular com chaminé e moega superiores; a tipologia 2, conformada por uma planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior; e tipologia 3, correspondente a uma planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um de seus desníveis.

Essas tipologias arquitetônicas podem ser encontradas em toda a zona cafeeira do centro da Colômbia, pelo fato de haver condições similares de cultura nos produtores, de clima, topografia, entre outros (SÁNCHEZ, 2016; PÉREZ RENDÓN; RAMÍREZ BUILES; PEÑA QUIÑONES, 2016).

2.1. Carga física de trabalho

A coleta de dados para determinar a carga física de trabalho foi realizada por meio de um medidor de frequência cardíaca da marca OMRONRBP710N, composto por um monitor de pressão arterial e frequência cardíaca automático e uma pulseira para colocar no braço. Este medidor de frequência cardíaca tem precisão de $\pm 5\%$ e uma faixa de medição de 40 a 180 batimentos por minuto. As medições foram feitas durante as atividades de trabalho e de repouso, antes, durante e depois de começar cada atividade, ou seja, três três medições por cada uma das seis atividades, sem uma frequência fixa, já que dependia da duração de cada atividade, por um período de três dias em cada uma das três tipologias de instalação para processamento úmido de café. A partir desses dados foi obtida a média e desvio-padrão para cada uma das seis atividades.

A carga física de trabalho foi determinada usando a técnica da frequência de pulso (FP), na coleta de dados e no seu processamento, complementada com o uso da técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC), principalmente no processamento de dados.

2.1.1. Técnica da Frequência de Pulso (FP)

No uso da técnica FP, segundo Martínez e Cubillos (2014), a média da frequência de pulso durante o trabalho, foi calculada por meio da Equação 1.

$$FPm = (O1T1 + O2T2 + O3T3 \dots OnTn)/Ts, \quad [Eq. 1]$$

em que FPm = frequência de pulso média durante o trabalho, em bpm (batimentos por minuto); O = frequência de pulso para cada atividade, em bpm (batimentos por minuto);

T = tempo registrado por cada atividade, em minutos; e Ts = somatório dos tempos efetivos de execução da atividade durante a jornada de trabalho, descontando os tempos de pausa, em minutos.

Foi calculada também a média dos pulsos de repouso (Pr); e o pulso médio durante a jornada de trabalho (Pw) foi calculado através da Equação 2.

$$Pw = FPM \times Ts + Pr \times Tp / (Ts + Tp) \quad [Eq. 2]$$

em que Pw = pulso médio durante a jornada de trabalho, em bpm (batimentos por minuto); e Tp = tempos de pausa, em minutos.

No uso da técnica FP, a carga física de trabalho foi classificada de acordo com o pulso médio durante a jornada total de trabalho, expresso na Tabela 1.

Tabela 1 – Classificação da carga física de trabalho através da técnica da Frequência de Pulso (FP)

Carga física do trabalho	Pulso em Bpm
Trabalho que não requer muito esforço	< 90
Trabalho que requer um esforço moderado	90 – 119
Trabalho que requer um esforço intenso médio	120 – 149
Trabalho que requer um esforço intenso	15 – 179
Trabalho que requer um esforço extremamente intenso	> 179

Fonte: Martínez e Cubillos (2014).

Quando Pw é inferior a 100 bpm, não são necessários tempos adicionais de repouso. Quando Pw é superior a este valor, são necessários tempos adicionais de recuperação (Trq), os quais devem ser calculados em proporção percentual à duração total da jornada de trabalho (MARTÍNEZ; CUBILLOS, 2014).

2.1.2. Técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC)

No uso da técnica FCC, a Carga Cardiovascular (CCV) foi determinada com base na Frequência Cardíaca de Repouso (FCR), na Frequência Cardíaca dos Trabalhadores durante os horários de trabalho (FCT) e na Frequência Cardíaca Máxima (FCM).

Para cálculo da Carga Cardiovascular, foi utilizada a Equação 3, proposta por Apud et al. (1989).

$$CCV = [(FCT - FCR) / (FCM - FCR)] \times 100 \quad [\text{Eq. 3}]$$

em que CCV = carga cardiovascular, em %; FCT = frequência cardíaca de trabalho, em bpm (batimentos por minuto); FCR = frequência cardíaca de repouso, em bpm (batimentos por minuto); e FCM = frequência cardíaca máxima, (220 – idade).

A Frequência Cardíaca Limite (FCL), em bpm, para a carga cardiovascular de 40% foi obtida pela Equação 4 (APUD et al., 1989b).

$$FCL = 0,40 \times (FCM - FCR) + FCR \quad [\text{Eq. 4}]$$

No uso da técnica FCC, a carga física de trabalho foi classificada de acordo com a frequência cardíaca de trabalho para cada atividade desenvolvida pelo trabalhador no processamento do café (Tabela 2).

Tabela 2 – Classificação da carga física de trabalho através da técnica da Frequência Cardíaca de Trabalho (FCC)

Carga física de trabalho	Frequência cardíaca em bpm
Muito leve	< 75
Leve	75 – 100
Moderadamente pesada	100 – 125
Pesada	125 – 150
Pesadíssima	150 – 175
Extremamente pesada	> 175

Fonte: Apud et al. (1989).

2.2. Avaliação postural

A avaliação postural foi feita segundo as posturas corporais mais frequentemente assumidas pelos trabalhadores das instalações para processamento úmido de café nas três tipologias de instalação, durante a realização das atividades principais do processo, segundo o observado *in loco*. Essas atividades foram especificamente o despulpamento, a lavagem, a classificação hidráulica, a secagem (baixar a camada de café dentro da secadora e alimentação de combustível da secadora) e a embalagem do café.

Para a análise das posturas adotadas pelo trabalhador na instalação durante o processamento úmido do café, foi utilizado o método OWAS (Ovako Working Posture Analysing System), por se considerar mais simples de ser aplicado em estudos iniciais nessa agroindústria. As posturas foram analisadas a partir de registros fotográficos do indivíduo na situação real de trabalho. Os registros fotográficos foram efetuados sem haver uma frequência de captura predefinida.

Durante a observação das posturas, foram consideradas aquelas relacionadas às costas, braços e pernas, ao uso de força necessária para desempenhar uma função e à fase da atividade. A cada postura foram atribuídos valores e um código de quatro dígitos, segundo o método OWAS, conforme a Tabela 3, em que o primeiro dígito indica a posição das costas; o segundo, posição dos braços; o terceiro, das pernas; e o quarto indica levantamento de carga ou uso de força (WILSON; CORLETT, 1991).

Cada postura foi classificada de acordo com a Tabela 4, na qual se observam os códigos com a combinação das posições das costas, braços e pernas, os quais determinam níveis de ação para as medidas corretivas, que também se evidenciam na mesma tabela. Cada medida corretiva recebe uma pontuação incluída no sistema de análise Win-OWAS, com o fim de categorizar o nível de ação para cada uma dessas medidas.

Tabela 3 – Composição dos códigos do método OWAS conforme a postura adotada

Critério	Códigos do método OWAS
COSTAS Dígito 1	1 – Ereta 2 – Inclinação para frente ou para trás 3 – Torcida ou inclinada para os lados
BRAÇOS Dígito 2	1 – Ambos os braços abaixo do nível dos ombros 2 – Um braço no nível dos ombros ou abaixo 3 – Ambos os braços no nível dos ombros ou acima
PERNAS Dígito 3	1 – Sentado 2 – De pé com ambas pernas esticadas 3 – De pé com o peso em uma das pernas esticadas 4 – De pé ou agachado com ambos os joelhos dobrados 5 – De pé ou agachado com um dos joelhos dobrados 6 – Ajoelhado em um ou ambos os joelhos 7 – Andando ou se movendo
PESO Dígito 4	1 – Peso ou força necessária é 10 kg ou menos 2 – Peso ou força necessária excede 10 kg, mas menor que 20 kg 3 – Peso ou força necessária excede 20 kg

Fonte: Adaptado do manual do WIN-OWAS (1990).

Tabela 4 – Categorias de ação segundo posição das costas, braços, pernas e uso de força no método OWAS

COSTAS	BRAÇOS	1			2			3			4			5			6			7			PERNAS
		1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	Força
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	
	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	
	3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	3	1	1	1	1	2	
2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	3	2	2	2	2	3	3	
	2	2	2	3	2	2	3	2	3	3	3	4	4	3	4	4	3	3	4	2	3	4	
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1	
	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	
	3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	
4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	
	2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	
	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	

Fonte: Wilson e Corlett (1991).

CATEGORIAS DE AÇÃO: 1 – Não são necessárias medidas corretivas; 2 – São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo; 3 – São necessárias correções tão quanto possível; 4 – São necessárias correções imediatas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Carga física de trabalho

A seguir são apresentadas as análises da carga física de trabalho nas tipologias de instalação para processamento úmido de café, a partir da Técnica da Frequência de Pulso (FP) e da Técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC).

3.1.1. Análise de dados com a técnica da Frequência de Pulso (FP)

Na Tabela 5 é possível observar que, segundo os resultados do pulso médio durante a jornada de trabalho (Pw), da técnica da FP, comparados com os valores de referência da Tabela 1, não se encontraram valores que possam representar perigo para a saúde dos trabalhadores; a jornada completa é classificada como trabalho que não requer muito esforço nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café. Embora os maiores valores encontrados de frequência de pulso estivessem perto ou acima de 100 bpm, eles não afetaram o resultado do Pw, o qual ficou com valores inferiores a esse, não sendo necessários tempos adicionais de recuperação, de acordo com Martínez e Cubillos (2014).

No entanto, comparando os resultados dos trabalhadores das três tipologias, pode-se ver que na tipologia 1 obteve-se um valor de Pw menor (77bpm) do que o das fazendas 2 e 3 (85 e 85 bpm, respectivamente), sendo esta a tipologia onde se apresentam menores esforços na execução das atividades. As tipologias 2 e 3 possuem atividades com os maiores valores de frequência de pulso nas três fazendas (entre 86 e 108 bpm), as quais são basicamente as que têm a ver com a máquina secadora de café (alimentação de combustível da secadora, baixar camada de café dentro da secadora, e embalagem do café).

Tabela 5 – Carga física de trabalho exigida na jornada de trabalho dentro das tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando a técnica da Frequência de Pulso (FP), a partir da média dos dados

TIPOLOGIA	Frequência de pulso e tempo de exposição em minutos	ATIVIDADES																FPm (frequência média de pulso) (Bpm)	Ts (somatório dos tempos efetivos de execução da tarefa durante a jornada de trabalho) (min)	Tp (tempos de pausa - café da manhã e almoço) (min)	Pr (pulso médio de repouso durante a jornada de trabalho) (Bpm)	Pw (pulso médio durante a jornada de trabalho) (Bpm)
		Despolpamento		Café da manhã		Lavagem do café		Classificação hidráulica		Secagem do café (baixar camada de café dentro da secadora)		Almoço		Secagem do café (alimentação de combustível da secadora)		Embalagem do café						
1	Frequência de pulso	75	± 4.5	72	± 2.5	77	± 3.5	79	± 7.1	75	± 3.5	72	± 3.0	83	± 6.1	83	± 4.5	78			72	77
	Tempo de exposição em minutos	60		60		120		140		1		60		20		30			371	120		
2	Frequência de pulso	83	± 3.1	79	± 1.2	85	± 1.2	86	± 1.5	87	± 2.5	79	± 2.5	81	± 3.1	88	± 4.6	86			79	85
	Tempo de exposição em minutos	60		30		120		140		60		30		1		90			471	60		
3	Frequência de pulso	75	± 5.1	72	± 3.1	75	± 5.1	76	± 4.6	86	± 3.1	72	± 3.5	108	± 14.2	96	± 8.6	89			72	85
	Tempo de exposição em minutos	60		30		1		1		60		30		20		90			232	60		

As atividades com tempo de exposição = 1 min, correspondem a processos que são realizados de forma automatizada.

Resultados similares foram encontrados na aplicação da técnica da FCC, onde foram comparados os mesmos dados, mas a classificação da carga física de trabalho foi dada para cada atividade. Assim, a análise dos resultados das três fazendas por cada atividade é apresentada como segue.

3.1.2. Análise de dados com a técnica de Frequência Cardíaca Contínua (FCC)

Na Tabela 6 pode-se observar que, de acordo com os dados da Frequência Cardíaca de Trabalho (FCT), nenhuma das tipologias para processamento úmido de café oferece valores preocupantes à manutenção da saúde dos trabalhadores. Assim mesmo, segundo os resultados da Carga Cardiovascular (CCV), todas as atividades, nas três tipologias estiveram abaixo do valor recomendado por Apud (1989), que é de 40% da Frequência Cardíaca de Trabalho (FCT). Por isso, não é necessário o cálculo do tempo de repouso para as atividades.

Tabela 6 – Carga física de trabalho exigida nas atividades dentro das tipologias de instalação para processamento úmido de café, com base em valores médios por atividade, aplicando a técnica da Frequência Cardíaca Contínua (FCC), na análise de dados

Atividades do trabalhador dentro da instalação (secagem mecânica de café paralelamente)	TIPOLOGIA	Processo manual	Processo automático	FCT (Bpm)		FCR (Bpm)		FCM (Bpm)	CCV (%)	FCL (Bpm)	Classificação carga física de trabalho	Tempo de exposição em minutos	Tr (min)
				Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão						
Despolpamento	1		X	75	± 4.5	72	± 2.5	183	3	118	Leve	60	-864
	2		X	83	± 3.1	79	± 1.2	186	4	124	Leve	60	-618
	3		X	75	± 5.1	72	± 3.1	184	3	119	Leve	60	-872
Lavagem de café	1	X		77	± 3.5	72	± 2.5	183	5	119	Leve	120	-1018
	2	X		85	± 1.2	79	± 1.2	186	6	125	Leve	120	-808
	3		X	75	± 5.1	72	± 3.1	184	3	119	Leve	1	-15
Classificação hidráulica	1	X		79	± 7.1	72	± 2.5	183	6	121	Leve	140	-832
	2	X		85	± 1.5	79	± 1.2	186	6	125	Leve	140	-943
	3		X	76	± 4.6	72	± 3.1	184	4	119	Leve	1	-11
Secagem de café (baixar camada de café dentro da secadora)	1		X	75	± 3.5	72	± 3.0	183	3	118	Leve	1	-14
	2	X		87	± 2.5	79	± 2.5	186	7	127	Leve	60	-297
	3	X		86	± 3.1	72	± 3.5	184	13	125	Leve	60	-168
Secagem de café (alimentação de combustível da secadora)	1	X		83	± 6.1	72	± 3.0	183	10	123	Leve	20	-73
	2		X	81	± 3.1	79	± 2.5	186	2	123	Leve	1	-21
	3	X		108	± 14.2	72	± 3.5	184	32	138	Moderadamente pesada	20	-17
Secagem de café (embalagem do café)	1		X	83	± 4.5	72	± 3.0	183	10	123	Leve	30	-109
	2	X		88	± 4.6	79	± 2.5	186	8	127	Leve	90	-392
	3	X		96	± 8.6	72	± 3.5	184	21	131	Leve	90	-136

Legenda: CCV = carga cardiovascular; FCT = frequência cardíaca de trabalho; FCL = frequência cardíaca limite; FCR = frequência cardíaca de repouso; e FCM = frequência cardíaca máxima.

Nota: Como os resultados de CCV não correspondem a uma porcentagem maior que 40% dos resultados de FCL, então não se sugere reorganização do trabalho com aumento em tempos de repouso segundo metodologia de Apud (1997).

Embora os valores de FCT e CCV estivessem dentro das faixas que não representam perigo para a saúde dos trabalhadores nas três fazendas, é importante destacar que, como aconteceu com a aplicação da técnica da FP, nas atividades relacionadas com a máquina secadora de café foram encontrados os maiores valores em ambos os aspectos, porém a técnica da FCC permitiu avaliar cada atividade individualmente:

- A carga de trabalho físico da atividade de secagem de café, na fase de alimentação de combustível da secadora, na tipologia 3 é classificada como moderadamente pesada, sendo a maior FCT encontrada (108 bpm), com CCV de 32%, enquanto nas tipologias 1 e 2 são classificadas como leves (83 e 81 bpm, respectivamente), com CCV de 10% e 2% respectivamente. Essa diferença pode ser porque o combustível para alimentar a secadora da fazenda 3 é lenha, e antes de alimentar a máquina o trabalhador tem que cortar a lenha no exterior da instalação de beneficiamento úmido de café, sendo submetido à radiação solar, e no momento de alimentar a máquina, além de levantar a lenha, o trabalhador está submetido ao calor do forno do trocador de calor da máquina aberto. No caso da tipologia 1, o combustível para alimentação da máquina secadora é casca de café (pergaminho), a qual permanece armazenada em sacos dentro da instalação, e o peso que o trabalhador tem que levantar com cada saco para a alimentação é menor de 10 kg, por causa da baixa densidade do combustível. Este combustível é jogado numa moega para alimentação do forno trocador de calor da máquina secadora, o qual evita submeter o trabalhador ao calor do forno trocador aberto. Entretanto, na tipologia 2, o esforço para alimentação de combustível da máquina secadora é mínimo, já que se trata apenas de abrir a válvula do gás no início do dia, o que o torna um processo automático ao longo da jornada. Esta operação é momentânea, permitindo combiná-la com outras atividades dentro da fazenda, próprias ou não próprias do processamento úmido de café, e possivelmente por essa razão o trabalhador estava com FCT de 81 bpm.
- Em ordem descendente, os seguintes valores de FCT foram encontrados na atividade de embalagem do café, relacionada diretamente com a máquina secadora, já que é preciso extrair o café dela para que seja embalado. Embora nesta atividade os trabalhadores das tipologias 2 e 3 realizem o trabalho manualmente e demorem 90 minutos na sua execução, além de lidar com o calor que sai da secadora aberta, o trabalhador da tipologia 3 teve uma FCT e uma CCV maior, com 96 bpm e 21%,

respectivamente, frente a uma FCT de 88 bpm e uma CCV de 8% do trabalhador da tipologia 2, possivelmente porque, nessa hora a temperatura da instalação foi maior do que nas tipologias 1 e 2.

- Isso concorda com os estudos de Martínez e Cubillos (2014), já que para eles, na medição da frequência cardíaca para estimar a carga de trabalho deve-se considerar que ela se vê afetada por fatores associados ao trabalho físico, entre os quais a temperatura. Além disso, segundo Dugas et al. (2005), o nível de experiência na execução de uma tarefa pode ter efeitos nos resultados na avaliação da frequência cardíaca: o trabalhador da tipologia 3 leva seis anos na execução da tarefa, frente a 19 anos do trabalhador da tipologia 2. A tipologia 1 tem valor menor de FCT, com 83 bpm e CCV de 10%, provavelmente porque o processo é automático e, por isso, demanda menor esforço e menos tempo.
- Os valores seguintes de FCT e CCV, em ordem decrescente, foram encontrados na atividade de secagem do café, na fase de baixar as camadas de café dentro da secadora. As tipologias 2 e 3 tiveram uma FCT de 87 e 86 bpm e uma CCV de 7% e 13%, respectivamente. Os trabalhadores de ambas as fazendas dedicam uma hora à atividade de forma manual, o que os obriga a entrar dentro da máquina de secagem; embora seja desligada antes, não há um tempo prudente para resfriar a máquina, ficando eles submetidos a temperaturas altíssimas, fazendo com que a frequência cardíaca aumente, além da frequência cardíaca produzida por outras atividades. Já na tipologia 1, esta atividade é automática, somente precisando de pressionar um botão, o qual evita a exposição do trabalhador ao calor da máquina.

No resto das atividades dos trabalhadores nas três tipologias, os valores encontrados para a FCT estiveram entre 75 e 85 bpm, enquanto os valores para o CCV estiveram entre 2% e 6%, todas com uma classificação de carga física de trabalho leve; nota-se que, de modo geral, os processos automáticos ajudam a reduzir esses valores.

De acordo com os resultados por atividades, pode-se afirmar que na tipologia 1 foram observados os menores esforços na execução das atividades, enquanto na tipologia 3 se apresentaram os maiores, que foi determinado fortemente pela automatização dos processos e pela relação das atividades com a máquina de secagem; na tipologia 1, a maior parte dessas atividades é automatizada.

Foi observado também que parte das diferenças entre os valores encontrados para FCT e CCV das três tipologias pode ser devido à funcionalidade do projeto arquitetônico da instalação para processamento úmido de café, já que o projeto mais

claro e que facilita a eficiência sem muito esforço é o da tipologia 1, enquanto nas tipologias 2 e 3 é necessário fazer percursos longos e, ou, subir e descer escadas repetidamente durante o processo, muitas vezes com carga, entre outros.

3.2. Análise postural

3.2.1. Processo de despulpamento do café

Na Tabela 7 é apresentada a classificação da postura assumida pelos trabalhadores das três fazendas na atividade de despulpamento de café. Como resultado, a categoria de postura para as três tipologias foi a de número 3, indicando que são necessárias correções na postura tão logo sejam possíveis.

Tabela 7 – Avaliação das posturas no sistema OWAS considerando o processo de despulpamento dentro das tipologias de instalação para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 		
Processo manual			
Processo automático	X	X	X
Descrição	Inclinada e torcida ou inclinada para frente e para os lados; Um braço no nível dos ombros ou abaixo; De pé com o peso em uma das pernas esticadas e força necessária é 10 kg ou menos.		
Dígitos da descrição	4 2 3 1		
Categoria	3		
Categoria de ação	São necessárias correções tão logo quanto possível		

Embora o processo de despolpamento tenha sido automático nas três tipologias, segundo as observações realizadas *in loco*, essa postura é comumente adotada durante esse processo, a cada 20 minutos aproximadamente, devido a problemas no funcionamento da máquina que faz a classificação do café despolpado. A peneira tem pequenos furos para dar saída ao café despolpado, mas o café que não é completamente despolpado fica preso nesses furos, e uma ampliação na máquina puxa esses grãos presos. Quando a ampliação não funciona bem, o funcionário tem que ajudar a puxar os grãos manualmente.

A providência a ser tomada nesse caso, nas três fazendas, é a manutenção imediata da máquina e continuar com as manutenções periódicas, para evitar seu funcionamento inadequado.

3.2.2. Processo de lavagem do café

Depois de despolpar o café e de submetê-lo à fermentação para a remoção da mucilagem, é preciso realizar sua lavagem.

Durante o processo de lavagem, quando o processo for manual, como no caso das tipologias 1 e 2 (Tabela 8), as posturas adotadas são principalmente duas: uma para jogar água sobre o café, nos tanques de fermentação, com ajuda de mangueira (postura 1), e outra para agitar o café por meio de um agitador manual (postura 2), com o fim de terminar de remover a mucilagem dos grãos.

A postura 1, observada nas tipologias 1 e 2, é classificada na categoria 1, e por isso a postura foi considerada normal e dispensa cuidados. A postura 2, presente nas tipologias 1 e 2, foi classificada como categoria 4, em que a postura merece correções de forma imediata.

Foi detectado que no processo manual, manter as costas inclinadas e torcidas ou inclinadas para frente e para os lados, assim como exercer uma força maior de 20 kg, é o que determina a categoria 4 para a postura 2, sendo o manejo próprio dos tanques de fermentação, o que obriga a manter a postura observada.

Tabela 8 – Avaliação das posturas no sistema OWAS, considerando o processo de lavagem do café dentro das tipologias de instalação, para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 		POSTURA 3  
	POSTURA 2 		
Processo manual	X	X	
Processo automático			X
Descrição	POSTURA 1: Costas eretas; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; De pé com ambas pernas esticadas e POSTURA 2: Costas inclinadas e torcidas ou inclinadas para frente e para os lados; Um braço no nível dos ombros ou abaixo; de pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária maior de 20 kg.		POSTURA 3: Costas eretas; um braço no nível dos ombros ou abaixo; de pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.
Dígitos da descrição	POSTURA 1: 1 1 2 1 POSTURA 2: 4 2 2 3		POSTURA 3: 1 2 2 1
Categoria	POSTURA 1: 1 POSTURA 2: 4		1
Categoria de ação	POSTURA 1: Não são necessárias medidas corretivas. POSTURA 2: São necessárias correções imediatas.		POSTURA 1: Não são necessárias medidas corretivas.

Nesse caso, para diminuir o impacto negativo na saúde do trabalhador, recomenda-se diminuir o tempo em que a postura é assumida, alternando a realização da atividade entre dois ou mais trabalhadores. Também é recomendada a NR 17, no ponto 17.3.5 para as atividades realizadas de pé; devem ser colocados assentos para descanso em locais que possam ser usados por todos os trabalhadores durante as pausas. Outra medida pode ser a diminuição da força exercida no movimento do agitador manual, utilizando um agitador furado, que facilite a passagem da água com café de um lado a outro do agitador. Contudo, para eliminar completamente o esforço nessa atividade, a automação do processo seria a melhor alternativa, como acontece com a fazenda 3, mas essa medida seria de longo prazo.

Quando o processo é automático, como no caso da tipologia 3, o café sai dos tanques de fermentação e, por meio de uma tubulação, chega por gravidade a uma bomba, a qual impulsiona o café com água por meio de outra tubulação para o lugar onde se realiza o processo de classificação hidráulica. Durante o percurso até a classificação hidráulica, os grãos, com ajuda da água, friccionam-se entre eles e removem a mucilagem. Nesse caso, a postura assumida não traz maiores inconvenientes, já que simplesmente é necessário pressionar um botão, sendo esta uma atividade instantânea, a qual é classificada como categoria 1, onde não são necessárias medidas corretivas.

3.2.3. Processo de classificação hidráulica do café

Quando a classificação hidráulica é realizada manualmente, como nas tipologias 1 e 2, o café sai dos tanques de fermentação, com ajuda da água, para o canal classificador. Nesse momento, como se pode ver nas posturas da Tabela 9, o operário começa a agitar o café por meio de um agitador manual, para fazer que saia o café boia (postura 1). O café boia sai do canal e cai em um pátio, ficando separado do café de melhor qualidade, o qual fica no fundo do canal. O café que cai no pátio é recolhido com ajuda de uma mangueira (postura 2), a fim de facilitar depois o transporte para a secadora.

A postura 1, comum nas tipologias 1 e 2, foi classificada na categoria 3. Segundo essa classificação, essa postura é merecedora de uma atenção em curto prazo. A postura 2, classificada na categoria 2, sugere uma verificação postural a longo prazo.

Tabela 9 – Avaliação das posturas no sistema OWAS, considerando o processo de classificação hidráulica dentro das tipologias de instalação para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 		POSTURA 3  Pressionar o botão  Canal classificador
	POSTURA 2 		
Processo manual	X	X	
Processo automático			X
Descrição	POSTURA 1: Costas inclinadas e torcidas ou inclinadas para frente e para os lados; Um braço no nível dos ombros ou abaixo; De pé com o peso em uma das pernas esticadas e força necessária excede 10 kg, mas menor que 20 kg.		POSTURA 3: Costas eretas; um braço no nível dos ombros ou abaixo; de pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.
	POSTURA 2: Costas inclinadas para frente ou para trás; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; De pé com ambas pernas esticadas e força necessária é 10 kg ou menos.		
Dígitos da descrição	POSTURA 1: 4 2 3 2 POSTURA 2: 2 1 2 1		POSTURA 3: 1 2 2 1
Categoria	POSTURA 1: 3 POSTURA 2: 2		POSTURA 3: 1
Categoria de ação	POSTURA 1: São necessárias correções tão logo quanto possível.		POSTURA 3: Não são necessárias medidas corretivas.
	POSTURA 2: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo.		

Na postura 1, as costas são mantidas em posição inadequada, acompanhada da força executada, pode causar problemas articulares, determinando a categoria 3, na qual é classificada. As medidas corretivas a serem consideradas podem ser, além do uso de um agitador manual furado para diminuir a força exercida, alternar a realização da atividade entre vários trabalhadores e, ou, adicionar pausas, conforme o item 17.6.3 da NR17, e aplicar o item 17.3.5 da NR 17, colocando assentos para serem usados durante as pausas. Em um prazo maior, pode-se pensar em descer o nível da calçada ao lado do canal classificador, fazendo com que o canal fique a uma altura tal que implique manter as costas mais eretas na agitação do café, e, finalmente, na automação da atividade.

Na tipologia, 3 o processo é automático: o café acompanhado de água sai da tubulação que vem da bomba e cai no canal classificador. Neste canal, o café boia vai flutuando até o final e sai por uma tubulação; o café de melhor qualidade vai para o fundo do canal, por ter maior densidade, e sai por outra tubulação diferente. Os dois tipos de café caem em pátios separados. A postura 3, assumida neste caso, consiste somente em pressionar um botão, fato que a classifica na categoria 1, onde não são necessárias medidas corretivas.

3.2.4. Processo de secagem (baixar camada de café dentro da secadora)

No caso do processo produtivo das fazendas em estudo, a secagem é realizada de forma mecânica. Na Tabela 10 é possível observar as diferentes posturas assumidas pelos trabalhadores em uma das fases da secagem, que é o fato de baixar as camadas de café dentro da secadora.

As máquinas de secagem das três tipologias estão conformadas por três níveis para secar o café de forma gradual. No início, coloca-se uma primeira camada de café no nível superior, a qual, depois de perder certa quantidade de umidade, deve ser passada para o segundo nível, ficando o nível superior disponível para uma camada nova. Esse processo é repetido com essas duas camadas para agregar uma terceira no nível superior da máquina, e o café que termina o processo é retirado do nível inferior da máquina.

Tabela 10 – Avaliação das posturas no sistema OWAS, considerando o processo de secagem do café (baixar camada de café dentro da secadora) dentro das tipologias de instalação, para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 (Todas as camadas)  Pressionar o botão	POSTURA 2 (Camada superior) 	POSTURA 3 (Camada superior e intermédia) 
	 Braço mecânico para baixar camadas de café	POSTURA 4 (Camadas inferiores) 	POSTURA 5 (Camada inferior) 
Processo manual		X	X
Processo automático	X		
Descrição	POSTURA 1: Costas eretas; um braço no nível dos ombros ou abaixo; de pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.	POSTURA 2: Costas inclinadas para frente ou para trás; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; Ajoelhado em um ou ambos os joelhos e força necessária é 10 kg ou menos.	
		POSTURA 3: Costas inclinadas e torcidas ou inclinada para frente e para os lados; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; De pé com ambas pernas esticadas e força necessária excede 10 kg, mas menor que 20 kg.	
		POSTURA 4: Costas inclinadas para frente ou para trás; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; Ajoelhado em um ou ambos os joelhos e força necessária é 10 kg ou menos.	
		POSTURA 5: Costas inclinadas para frente ou para trás; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; Ajoelhado em um ou ambos os joelhos e força necessária é 10 kg ou menos.	
Dígitos da descrição	POSTURA 1: 1 2 2 1	POSTURA 2: 2 1 6 1	
		POSTURA 3: 4 1 2 2	
		POSTURA 4: 2 1 6 1	
		POSTURA 5: 2 1 6 1	
Categoria	POSTURA 1: 1	POSTURA 2: 2	
		POSTURA 3: 2	
		POSTURA 4: 2	
		POSTURA 5: 2	
Categoria de ação	Não são necessárias medidas corretivas.	POSTURA 2: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo	
		POSTURA 3: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo	
		POSTURA 4: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo	
		POSTURA 5: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo	

Quando as camadas de café são baixadas de um nível para outro de forma automática, como no caso da tipologia 1, um braço mecânico que tem cada camada dentro da secadora se movimenta, fazendo descer o café. A postura 1 mostrada na Tabela 10, onde somente é necessário pressionar um botão para que a secadora funcione, é classificada na categoria 1, ficando dispensada de cuidados.

Entretanto, nas tipologias 2 e 3, essa fase do processo de secagem é realizada manualmente. No caso da tipologia 2, o operário tem de estar ajoelhado e com as costas inclinadas quase totalmente para arrastar o café até um pequeno orifício, por onde ele desce de um nível para outro, conforme as posturas 2 e 4 da **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..** Na tipologia 3, o operário fica em pé, atravessando a mesma abertura por onde o café desce do nível superior para o nível intermediário e deste para o nível inferior, enquanto no nível inferior ele tem que ficar ajoelhado e com as costas inclinadas quase totalmente, similar ao operário da fazenda 2, conforme as posturas 3 e 5 da Tabela 10.

As posturas 2, 3, 4 e 5 da Tabela 10 foram classificadas como categoria 2, precisando de verificação em longo prazo. De acordo com essa classificação, vale a pena pensar na implementação de uma máquina que facilite a automação do processo no futuro.

3.2.5. Processo de secagem (alimentação do combustível da secadora)

Na tipologia 1, o combustível utilizado para o funcionamento da máquina de secagem é pergaminho seco ou casca de café (Tabela 11). Embora o trabalhador tenha que subir em uma cadeira e levantar ambos os braços para alimentar a máquina de combustível, devido à altura da moega que recebe o combustível, o peso deste último é determinante na classificação da postura, uma vez que, por sua pouca densidade, os sacos cheios de casca de café pesam menos do que 10 kg. Nesse caso, a postura 1 é classificada como categoria 1, ficando desobrigada de medidas corretivas. Entretanto, é bom ressaltar que não é seguro nem ergonômico para o trabalhador o uso de uma cadeira para realizar essa atividade, sendo necessária a utilização de escadas, medida tomada em curto prazo.

Na tipologia 2, o combustível para a secadora é gás, que torna automática esta fase do processo, sendo apenas necessário abrir a válvula de gás no início da secagem (postura 2 da Tabela 11), classificando a postura 2 na categoria 1 do método OWAS, ou seja, que pode prescindir de medidas de correção.

Tabela 11 – Avaliação das posturas no sistema OWAS, considerando o processo de secagem do café (alimentação do combustível da secadora) dentro das tipologias de instalação, para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 (Combustível de casca de café)  Moega de combustível Cadeira para alimentação de combustível	POSTURA 2 (Combustível de gás) 	POSTURA 3 (Combustível de lenha)  POSTURA 4 (Combustível de lenha) 
Processo manual			X
Processo automático	X	X	
Descrição	POSTURA 1: Costas eretas; Ambos os braços no nível dos ombros ou acima; De pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.	POSTURA 2: Costas eretas; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; De pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.	POSTURA 3: Costas inclinadas e torcidas ou inclinadas para frente e para os lados; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; Andando ou se movendo e força necessária excede 10 kg, mas menor que 20 kg. POSTURA 4: Costas inclinadas e torcidas ou inclinadas para frente e para os lados; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; Andando ou se movendo e força necessária é 10 kg ou menos.
Dígitos da descrição	POSTURA 1: 1 3 2 1	POSTURA 2: 1 1 2 1	POSTURA 3: 4 1 7 2 POSTURA 4: 4 1 7 1
Categoria	POSTURA 1: 1	POSTURA 2: 1	POSTURA 3: 3 POSTURA 4: 2
Categoria de ação	POSTURA 1: Não são necessárias medidas corretivas.	POSTURA 2: Não são necessárias medidas corretivas.	POSTURA 3: São necessárias correções tão logo quanto possível. POSTURA 4: São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo.

Na tipologia 3, é utilizada lenha como combustível para a secadora de café. Dentro da instalação para processamento úmido de café, foram observadas duas posturas principais nessa fase do processo de secagem, sendo elas a postura 3 e a postura 4 da Tabela 11. Na postura 3, o trabalhador tem que inclinar suas costas para pegar a lenha do piso e suportar o peso dela, entre 10 e 20 kg aproximadamente, sendo a posição das costas e o peso determinantes para sua classificação. A postura 3 se classifica como categoria 3, havendo assim a necessidade de verificação em curto prazo. Já na postura 4, o trabalhador está terminando de alimentar a máquina de combustível e fechando-a, o que significa menor esforço para ele, sendo a postura classificada como categoria 2; de acordo com esta classificação, torna-se necessária a verificação dessas posturas no longo prazo.

Como medida de curto prazo para corrigir as posturas na fazenda 3, além de alternar a realização da atividade entre vários trabalhadores ou, adicionar pausas conforme o item 17.6.3 da NR17, pode-se aplicar o item 17.3.5 da NR 17, dispondo assentos para seu uso durante as pausas. Também é possível pensar em mudar de combustível, já que foi observado que o trocador de calor da máquina de secagem nesta fazenda pode trabalhar também com carvão e pergaminho ou casca de café, o qual se pode manejar em sacos e tem peso muito menor do que a lenha.

3.2.6. Processo de embalagem do café seco

Na Tabela 12 encontram-se as posturas predominantes neste processo.

Na tipologia 1, a máquina de secagem joga o café seco através de uma tubulação, sendo o café que sai dela diretamente embalado nos sacos, o que é considerado um processo automático. A postura 1 é assumida pelo trabalhador unicamente para manter os sacos abertos enquanto são preenchidos com café. Tal postura exige pouco esforço para carregar peso e mantém o corpo erguido e com os braços abaixo, o que a classifica na categoria 1, na qual não são necessárias medidas de correção.

Tabela 12 – Avaliação das posturas no sistema OWAS, considerando o processo de embalagem do café seco dentro das tipologias de instalação, para processamento úmido de café

	TIPOLOGIAS		
	1	2	3
Postura	POSTURA 1 	POSTURA 2 	
Processo manual		X	X
Processo automático	X		
Descrição	POSTURA 1: Costas eretas; Ambos os braços abaixo do nível dos ombros; de pé com ambas pernas esticadas e com uma força necessária menor de 10 kg.	POSTURA 2: Costas inclinadas para frente ou para trás; ambos os braços abaixo do nível dos ombros; de pé ou agachado com ambos os joelhos dobrados e força necessária excede 10 kg, mas menor que 20 kg.	
Dígitos da descrição	POSTURA 1: 1 1 2 1	POSTURA 2: 2 1 4 2	
Categoria	POSTURA 1: 1	POSTURA 2: 3	
Categoria de ação	POSTURA 1: Não são necessárias medidas corretivas.	POSTURA 1: São necessárias correções tão logo quanto possível.	

Entretanto, na postura 2, comum nas tipologias 2 e 3, é evidenciado um processo de embalagem manual, em que o café cai do nível inferior da máquina de secagem no piso e o trabalhador tem que preencher um recipiente com esse café, para depois jogá-lo dentro dos sacos. Nessa postura é determinante a posição das costas, as quais têm de estar inclinadas, combinada com o peso que o trabalhador tem que carregar (entre 10 e 20 kg), para fazer a embalagem do café. A postura 2 é classificada então como categoria 3 no método OWAS; de acordo com essa classificação, esta postura é merecedora de atenção no curto prazo.

Segundo Do Rio e Pires (2001), as atividades que exigem posturas inadequadas do trabalhador, manuseio incorreto e levantamento de cargas excessivas

podem provocar a degeneração dos discos articulares. A coluna lombar é normalmente a que sofre mais carga em razão da sustentação do tronco, apresentando maior incidência de dor.

Em curto prazo, uma forma de diminuir os problemas produzidos por posturas inadequadas durante a realização das atividades é a partir da elaboração de um programa de treinamento das posturas mais adequadas a serem adotadas durante aquelas atividades em que são necessárias medidas corretivas, no caso específico da postura 2 na Tabela 12, no ato de recolher o café, levá-lo e jogá-lo dentro dos sacos. Também é possível aplicar o recomendado em posturas anteriormente analisadas, como alternar o trabalho com outros operários, adicionar pausas conforme o item 17.6.3 da NR17, ou aplicar o item 17.3.5 da NR 17, colocando assentos para serem usados durante as pausas. Em longo prazo, a automação do processo é a melhor opção para a saúde do trabalhador.

Analisando a síntese das categorias resultantes das posturas nas três tipologias segundo o sistema OWAS (Tabela 13), pode-se dizer que na primeira parte do processamento úmido do café, especificamente na lavagem e na classificação hidráulica do grão, a tipologia 3, graças à automatização desses processos, apresenta menores esforços ergonômicos, sendo as tipologias 1 e 2 aquelas com os maiores problemas de postura, concentrados principalmente nessa fase do processamento. Entretanto, na segunda parte do processamento, concretamente na secagem e embalagem do café, a tipologia 1 exige os menores esforços, também por conta da automação, enquanto a tipologia 3 requer os maiores.

Tabela 13 – Síntese das categorias resultantes das posturas nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, segundo o sistema OWAS

Atividade	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Despolpamento	3	3	3
Lavagem café	1 4	1 4	1
Classificação hidráulica	3 2	3 2	1
Secagem de café (baixar camada de café dentro da secadora)	1	2	2
Secagem de café (alimentação de combustível da secadora)	1	1	3 2
Secagem de café (embalagem do café)	1	3	3

1 - Não são necessárias medidas corretivas.

2 - São necessárias medidas corretivas em um futuro próximo.

3 - São necessárias correções tão logo quanto possível.

4 - São necessárias correções imediatas.

4. CONCLUSÕES

Na avaliação da carga física de trabalho nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café avaliadas, através da técnica da (FP), a totalidade da jornada de trabalho foi classificada como trabalho que não requer muito esforço nas três fazendas, sendo destacada a tipologia 1, em razão dos menores esforços.

Na avaliação por meio da técnica da FCC, nas três tipologias, classificando cada atividade de forma individual, em termos gerais, as atividades não estiveram dentro das categorias que representam perigo para a saúde dos trabalhadores. Dessa forma, não foi necessário fazer recomendações. Contudo, os maiores valores de frequência cardíaca podem ser atribuídos às atividades relacionadas com exposição ao calor gerado pela secadora de café, enquanto os menores valores, em sua maioria, são decorrentes da automação das atividades, seguida da funcionalidade do projeto arquitetônico. Os menores esforços também foram encontrados na tipologia 1.

Quanto à análise postural, nas posturas que geraram maiores riscos ergonômicos nas três tipologias, os trabalhadores ficaram em pé por longos períodos de tempo, com o tronco inclinado e torcido, e, ou, houve exigência de aplicação de

muita força, o que concorda com Iida (2005), sendo classificadas nas categorias 3 e 4 do método OWAS.

A tipologia 1 destaca-se por apresentar menores riscos ergonômicos nas fases de secagem e embalagem do café, enquanto a tipologia 3 sobressai por menores riscos nas fases de lavagem e classificação hidráulica – todas atividades automáticas nas respectivas tipologias.

Os processos manuais de despulpamento, lavagem e classificação hidráulica do café apresentaram os maiores problemas posturais, principalmente nas tipologias 1 e 2. Alimentação de combustível da secadora e embalagem manual tiveram posturas mais críticas na tipologia 3.

Como possíveis medidas corretivas, foram recomendados treinamentos para adoção de posturas seguras, alternância do trabalho entre vários operários, pausas dentro dos períodos das atividades e colocação de assentos para uso durante as pausas, conforme sugerido na NR17, como medidas imediatas. Em médio e longo prazos, foi recomendada a troca de ferramentas e, ou, maquinaria para automatizar os processos, bem como modificações na instalação.

5. REFERÊNCIAS

ANDRADE, Reymar Coutinho de. **Tendência do processamento pós-colheita de café arábica no Brasil**. Pinhalense Máquinas Agrícolas, 2010.

APUD, E. et al. **Guide-lines on ergonomic study in forestry. Prepared for research workers in developing countries**. ILO, 1989.

BRASIL. **Norma Regulamentadora 15, de 08 de dezembro de 2011**. Regulamenta as atividades e operações insalubres. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. **Norma Regulamentadora 17, de 08 de junho de 1978**. Estabelece parâmetros que permitam a adaptação das condições de trabalho às características psicofisiológicas dos trabalhadores, de modo a proporcionar um máximo de conforto, segurança e desempenho eficiente. Brasília, DF, 1978.

CARDOSO JUNIOR, Moacyr Machado. Avaliação ergonômica: revisão dos métodos para avaliação postural. **Produção Online – Revista Científica Eletrônica de Engenharia de Produção**, v. 6, n. 3, 2006.

CARVALHO, C. da C. Siqueira et al. Segurança, saúde e ergonomia de trabalhadores em galpões de frangos de corte equipados com diferentes sistemas de abastecimento de ração. **Engenharia Agrícola**, v. 31, n. 3, p. 438-447, 2011.

COLOMBIA. Ministério de Trabajo y Seguridad Social de Colombia. **Resolución 2.400 de 1979**. Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. 1979.

COUTO, H. de A. Ergonomia na prevenção da falha humana e na melhoria da confiabilidade humana no trabalho. In: COUTO, H. de A. **Ergonomia aplicada ao trabalho: o manual técnico da máquina humana**. Belo Horizonte, MG: Ergo, 1995. v. 2.

DE BRUIJN, I.; ENGELS, J.A.; VAN DER GULDEN, J.W.J. A simple method to evaluate the reliability of OWAS observations. **Applied Ergonomics**, v. 29, n. 4, p. 281-283, 1998.

DO RIO, R.P.; PIRES, L. **Ergonomia: fundamentos da prática ergonômica**. LTr, 2001.

DUGAS, L.R. et al. A novel energy expenditure prediction equation for intermittent physical activity. **Medicine and Science in Sports and Exercise**, v. 37, n. 12, p. 2154, 2005.

EVANGELISTA, Wemerton Luís. **Análise ergonômica do trabalho em um frigorífico típico da indústria suinícola do Brasil**. 2011. 165 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2011.

GONZALES, J. et al. Impacto de un programa ergonómico en la productividad de una empresa de fabricación de envases de hojalata. **Agroindustrial Science**, v. 6, n. 2, p. 213-219, 2017.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. **Total production by all exporting countries**. London, 2015.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: projeto e produção**. 2.ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2005.

KROEMER, K.H.; GRANDJEAN, E. **Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem**. Porto Alegre, RS: Bookman, 2005.

MAIA, L.R.; RODRIGUES, L.B. Saúde e segurança no ambiente rural: uma análise das condições de trabalho em um setor de ordenha. **Ciência Rural**, v. 42, n. 6, 2012.

MAIA, L.R.; FERRAZ, S.P.; RODRIGUES, L.B. Assessment of working conditions in an animal feed mill. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 24, n. 2, p. 147, 2016.

MARTÍNEZ, J.A.C.; CUBILLOS, A. Uso de la frecuencia del pulso en la estimación de la carga de trabajo: evaluación de una actividad de movilización de cargas. **Ciencias de la Salud**, v. 12, n. 4, p. 27-43, 2014.

OLIVEIRA, Regina Márcia Rangel de. **A abordagem das lesões por esforços repetitivos/distúrbios osteomoleculares relacionados ao trabalho – LER/DORT no Centro de Referência em Saúde do Trabalhador do Espírito Santo – CRST/ES.** 2001. 143 p. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Fundação Oswaldo Cruz, Escola Nacional de Saúde Pública, Rio de Janeiro, RJ, 2001.

PÉREZ RENDÓN, E.P.; RAMÍREZ BUILES, V.H.; PEÑA QUIÑONES, A.J. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. **Investigaciones Geográficas**, n. 89, p. 23-40, 2016.

ROSENBLAT, V. **Principle of physiological assessment of heavy physical work based on pulse rate, in functions of organism during work process.** Moscow: Economic Publishers, 1975.

SÁNCHEZ, L.M. La contabilidad en la conservación del paisaje cultural cafetero: retos y posibilidades. **Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**, v. 8, p. 57-70, 2016.

SILVA, Walney Gomes da. **Análise ergonômica do posto de trabalho do armador de ferro na construção civil.** 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2001.

VOSNIAK, J. et al. Avaliação da postura de trabalhadores nas atividades de plantio e adubação em florestas plantadas. **Revista Ceres**, v. 58, n. 5, p. 584-592, 2011.

WILSON, J.R.; CORLETT, E.N. Evaluation of human work: s practical ergonomics methodology. **Applied Ergonomics**, v. 22, n. 1, p. 58, 1991.

WIN-OWAS. **Manual software for OWAS analysis.** Tampere University of Technology, Occupational and Safety Engineering, 1990.

CAPÍTULO 3 – ANÁLISE BIOCLIMÁTICA DE UNIDADES TIPOLÓGICAS DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ NA COLÔMBIA, A PARTIR DE SIMULAÇÕES COMPUTACIONAIS ENERGYPLUS™

RESUMO: Este capítulo objetiva avaliar o comportamento bioclimático de unidades tipológicas de processamento úmido de café na Colômbia, a partir de simulações computacionais usando a ferramenta Energy Plus™. Foi realizado um mapeamento da temperatura e umidade relativa do ar no interior de três tipologias de instalação para processamento úmido de café representativas do estado de Antioquia, Colômbia, a partir de dados experimentais. Posteriormente foi realizada a elaboração, verificação e validação do modelo de simulação dessas três tipologias, com base nos dados experimentais. Foram realizadas três análises nas três tipologias, aplicando o modelo de simulação durante o mês com maior produção de café: o IBUTG, o comportamento higrotérmico com relação à qualidade do café e o gasto energético. O mapeamento de temperatura e umidade relativa do ar evidenciou problemas nas três tipologias para atingir as condições recomendadas para conservar a qualidade do café; quanto às condições para trabalhadores, foi atendida apenas a temperatura nas tipologias 1 e 2. O modelo de simulação proposto pode prever o comportamento higrotérmico dentro das três tipologias de instalação para processamento úmido de café. O limite do IBUTG não foi superado por nenhuma das três tipologias aplicando o modelo de simulação, em que a tipologia 1 teve os menores valores, seguida dos modelos das tipologias 2 e 3. A temperatura do ar simulada, nas três tipologias, esteve acima do limite recomendado, sendo as tipologias 3 e 2 o caso mais e menos crítico, respectivamente. Na umidade relativa do ar simulada, as três tipologias não atingiram a faixa recomendada; a tipologia 2 teve os maiores valores, seguida das tipologias 1 e 3. O gasto energético simulado nas três tipologias foi determinado pelo tipo de combustível utilizado no trocador de calor das secadoras, enquanto sua disponibilidade determinou o custo econômico, sendo o gás o mais eficiente energeticamente e de menor efeito sobre o ambiente térmico; contudo, a casca de café resultou ser mais econômica e mais eficiente em comparação com o carvão.

Palavras-chave: modelo de simulação, mapeamento, IBUTG, comportamento higrotérmico, EnergyPlus.

1. INTRODUÇÃO

O café é uma das bebidas de maior consumo no mundo (LÓPEZ F., 2006), tendo alcançado aumento anual médio de 1,9% nos últimos 50 anos (ICO, 2015). O Brasil e a Colômbia são o primeiro e o terceiro produtor, respectivamente, somando aproximadamente 40% da produção mundial de café (ICO, 2015).

Na Colômbia, o café é processado principalmente por via úmida, através de subprocessos que incluem despulpamento, fermentação, lavagem e secagem dos grãos (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016). As condições bioclimáticas das instalações onde são desenvolvidos esses processos podem ser determinantes tanto para o conforto

dos trabalhadores quanto para a conservação da qualidade do café, sobretudo considerando a grande quantidade de calor e vapores gerados pelas máquinas durante a secagem mecânica (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016). Em se tratando da potência de consumo energético nessas instalações, os requerimentos energéticos para a secagem de café podem ser muito elevados, levando em consideração que a eficiência das secadoras é de 50% (OLIVEROS TÁSCON et al., 2009), 50% do calor restante pode aumentar as temperaturas do ambiente.

Os operários do processamento úmido de café, além de estarem expostos a essas condições ambientais, têm que desenvolver atividades de bastante exigência física, que pode gerar estresse térmico, ocasionando debilidade do estado geral de saúde, alterações das reações psicossensoriais e queda de produção (LAMBERTS; XAVIER; GOULART, 2011). Para Todd e Valleron (2015), o calor gerado aumenta com o aumento da atividade física; segundo Bitencourt, Ruas e Maia (2012), a combinação dessa situação com um ambiente térmico estressante pode resultar em riscos laborais consideráveis, que têm sido responsáveis por muitas mortes.

A RD 486/1997, norma onde estão estabelecidas disposições mínimas de segurança e saúde nos locais de trabalho (COLOMBIA, 1997), recomenda em ambientes internos, para trabalhos com requerimentos físicos maiores do que os sedentários, um intervalo de temperatura do ar de 14°C a 25°C, e em termos gerais uma umidade relativa do ar entre 30% e 70%.

Ademais, para avaliar o desempenho humano no trabalho em condições de exposição ao calor, diferentes normas têm definido o uso do Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG), entre elas, a Resolução 2400 de 1979 para estabelecer algumas disposições sobre habitação, higiene e segurança nos locais de trabalho na Colômbia (COLOMBIA, 1979); a norma internacional ISO 7243, para estimar o estresse por calor dos trabalhadores (ISO, 1982); e a norma regulamentadora do Brasil – NR 15, anexo n. 3 (BRASIL, 2011). Estas duas últimas normas também estabelecem as linhas para o cálculo do IBUTG, além de propor seus limites.

Para Couto (1995), o IBUTG funciona como um indicador de conforto térmico que considera a temperatura do ar, metabolismo, calor radiante, velocidade e umidade relativa do ar como os principais geradores da sobrecarga térmica.

Entretanto, a qualidade do café pode-se ver comprometida, principalmente durante a armazenagem, já que na maioria das unidades de processamento úmido de café na Colômbia, é possível também encontrar zonas destinadas à sua armazenagem,

combinadas com as zonas destinadas ao restante dos processos, inclusive a secagem mecânica. Isso se deve ao fato de que produtores afastados frequentemente armazenam o café em pergaminho seco por longos períodos antes que seja transportado para os pontos de venda (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016).

Segundo Puerta Quintero (2008), ambientes com alta temperatura e umidade durante a armazenagem podem danificar fisicamente os grãos e propiciar sua decomposição. Para Navarro e Noyes (2001), ambientes com umidade relativa do ar entre 70% e 80% propiciam o aparecimento de fungos e podem gerar acumulação de umidade nos grãos armazenados, enquanto umidades acima de 85% ocasionam a proliferação de leveduras e bactérias. Segundo estes autores, temperaturas superiores a 50°C podem “matar” a semente de café e iniciar seu processo de decomposição.

De acordo com Puerta Quintero (2003), a qualidade do café pergaminho seco armazenado na Colômbia, com umidade entre 10% e 12% no grão, pode ser conservada durante o máximo de seis meses com temperatura abaixo de 20°C e umidade relativa entre 65% e 70%. Condições ambientais diferentes afetam finalmente a qualidade da bebida.

Estudos sobre as condições bioclimáticas das unidades tipológicas de processamento úmido de café são incipientes. As poucas pesquisas disponíveis sugerem a existência de problemas nessas instalações com comportamentos inadequados na ambiência que podem afetar a qualidade do café (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2015, 2016), ao passo que inexistem pesquisas que avaliem o conforto térmico dos trabalhadores dentro delas. Este último é, segundo Herrera et al. (2015), um problema generalizado na indústria alimentar, sobretudo na América Latina e no Caribe, onde embora esteja crescendo essa indústria, ainda não existem estudos confiáveis que mostrem o panorama das condições de trabalho nesse setor.

Analisar as condições bioclimáticas e sugerir soluções dentro das construções agroindustriais, através da modelagem matemática e computacional, são atitudes cada vez mais adotadas e importantes (NORTON et al., 2009). Segundo Bre, Fachinotti e Bearzot (2013), a simulação computacional vem se tornando uma ferramenta muito interessante na etapa de design e avaliação das construções, porque estas envolvem aspectos complexos, como fluxos de energia transientes, padrões de ocupação estocásticos etc., que os métodos de projeto tradicionais baseados na experiência ou experimentação não podem quantificar satisfatoriamente. Contudo, na avaliação do

ambiente construído, os modelos computacionais devem ser validados com dados experimentais a fim de obter resultados confiáveis.

Um dos softwares de simulação bioclimática e energética para construções mais difundidos mundialmente é o EnergyPlus™ (UNITED STATES, 2012). Trata-se de um software de código aberto desenvolvido pelo U.S. Department of Energy (DoE), capaz de simular até um ano completo, com dados climáticos para cada hora do ano. As principais variáveis de entrada do EnergyPlus™ são a geometria da edificação, as propriedades físicas dos materiais da construção, características dos equipamentos internos, como potência e padrões de uso, assim como o arquivo climático da zona onde se localiza a edificação (UNITED STATES, 2012).

Devido ao longo período de produção de café na Colômbia, através de softwares como o EnergyPlus™ é possível gerar modelos computacionais que permitam avaliar o comportamento bioclimático desse tipo de instalação durante esse tempo, para obter resultados mais amplos, visando à geração de soluções que beneficiem tanto o café quanto o trabalhador.

Este estudo objetivou avaliar o comportamento bioclimático de unidades tipológicas de processamento úmido de café na Colômbia, a partir de simulação computacional usando a ferramenta Energy Plus.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Estudo de temperatura e umidade relativa do ar através de mapeamento a partir de dados experimentais

Para realizar essa análise, foram consideradas as tipologias de instalação para processamento úmido de café representativas do estado de Antioquia, Colômbia, descritas no capítulo 1 desta pesquisa. A tipologia 1 foi constituída por um prisma retangular com chaminé e moega superiores; a tipologia 2, por uma planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior; e a tipologia 3, por uma planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um de seus desníveis.

É possível encontrar essas tipologias arquitetônicas em toda a zona cafeeira do centro da Colômbia, em razão de haver condições similares na cultura dos cafeicultores, no clima, na topografia, entre outros (SÁNCHEZ, 2016; PÉREZ RENDÓN; RAMÍREZ BUILES; PEÑA QUIÑONES, 2016).

Para sua seleção, foram consideradas características similares nas três tipologias, como condições geográficas e bioclimáticas de localização, volume de

produção de 30 toneladas de café pergaminho ao ano, secagem mecânica, concepções arquitetônicas representativas da zona cafeeira colombiana e período de produção máxima entre outubro e novembro.

Foram coletados dados de forma experimental durante três dias em cada tipologia entre outubro e novembro de 2016.

Nas três tipologias foram realizadas medições de temperatura de bulbo seco (tbs) e temperatura de bulbo úmido (tbu), por meio de um termômetro digital da marca Delta OHM, modelo HD 32.1(f), cujo sensor de temperatura de bulbo seco tem faixa de medição de -40 a 100°C, e o de temperatura de bulbo úmido, de 4 a 100°C. Essas medições foram feitas no horário de trabalho (das 7 às 19 horas), com intervalos de uma hora, em diferentes pontos distribuídos por cada instalação, a uma altura de 1,50 m, pela mesma pessoa. Por meio desses dados, foram extraídos os valores da umidade relativa do ar de cada ponto, com ajuda do gráfico psicrométrico.

Com base nos dados de ambas as variáveis ambientais, foi extraída a média dos três dias de coleta de cada ponto, correspondente à umidade relativa do ar, com ajuda do gráfico psicrométrico. Partindo das médias dos dados de temperatura do ar coletados por três dias de cada ponto, assim como das médias de umidade relativa do ar de cada ponto, foi realizado um mapeamento para fazer uma análise do ambiente térmico das três instalações.

Os resultados foram confrontados com as faixas de temperatura e umidade relativa do ar recomendadas para trabalhadores, pelo Ministerio de Trabajo y Asuntos Sociales (COLOMBIA, 1997) – entre 14°C e 25°C e entre 30% e 70%, respectivamente –, e para a conservação do café, por Puerta Quintero (2003) – de 20°C e entre 65% e 70%, respectivamente.

Na Figura 1 são apresentadas as plantas arquitetônicas das instalações para processamento úmido de café (tipologias 1, 2 e 3), com a distribuição dos pontos onde foi realizada a coleta de dados de tbs e tbu.

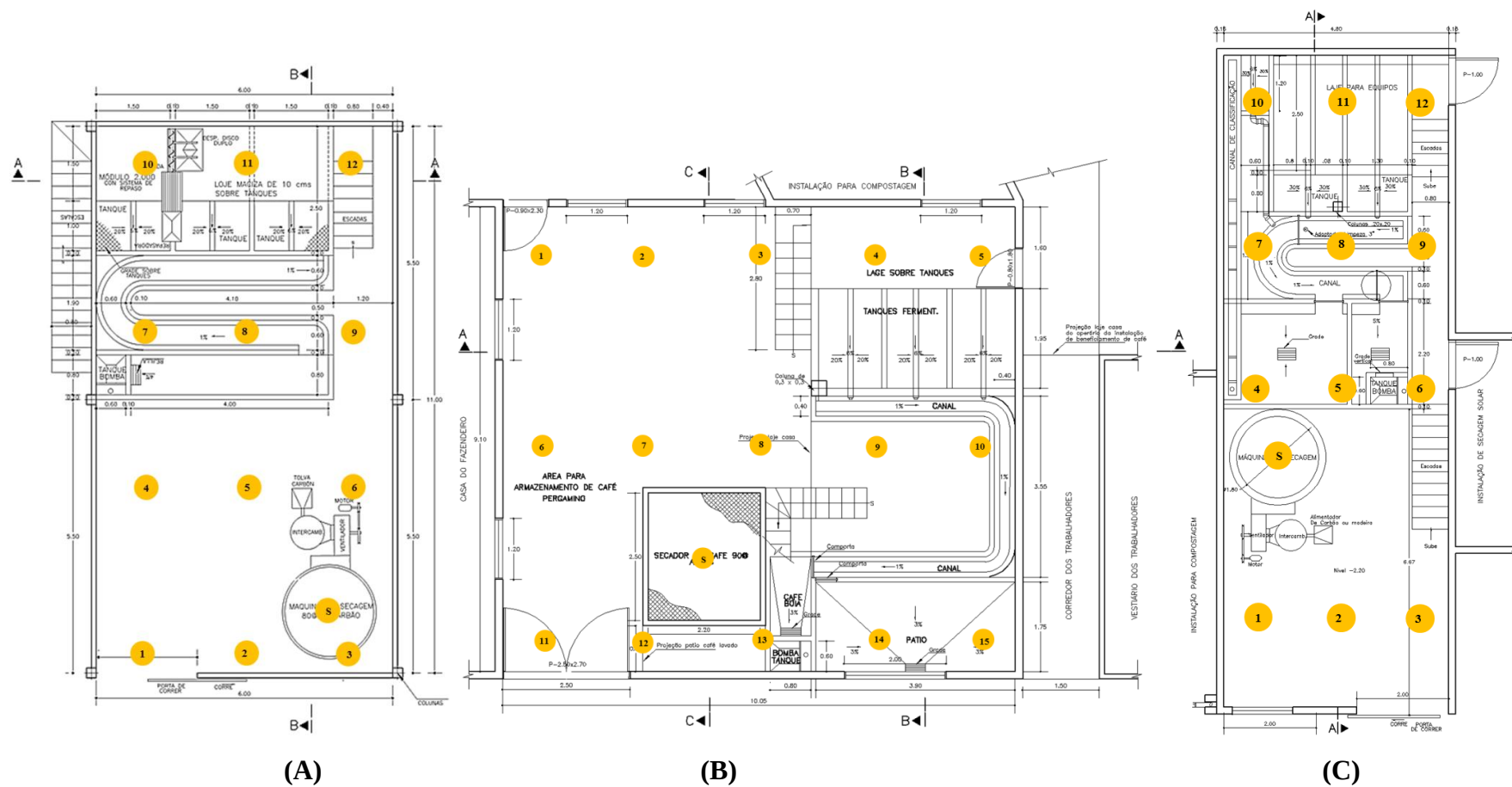


Figura 1 – Distribuição de pontos para coleta de dados de tbs e tbu na planta arquitetônica das três tipologias de instalação para processamento úmido de café: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

2.2. Estudo de simulação computacional

O estudo de simulação computacional foi realizado para todo o mês de novembro, que foi o de maior produção durante a colheita de café.

A análise das tipologias de instalação para processamento úmido de café com o uso do EnergyPlus™ foi realizada através de três tópicos, os quais serão explicitados a seguir.

2.2.1. Elaboração, verificação e validação do modelo de simulação aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café

Para desenvolvimento deste tópico, foram necessários os seguintes procedimentos:

1) Coleta de dados experimentais

Foram realizadas medições de temperatura e de umidade relativa do ar dentro das três tipologias, por meio de um datalogger Extech Instruments da marca RHT20, com intervalo de medição de temperatura de -40°C a 70°C e resolução de 0,1°C, bem como de 0% a 100% para umidade relativa, com resolução de 0,1. As medições foram feitas durante três dias contínuos, entre os meses de outubro e novembro de 2016, a cada cinco minutos, fixando o equipamento no centro geométrico de cada instalação.

2) Elaboração do modelo de simulação a ser aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café

A) Dados de entrada para o modelo de simulação

Para estabelecer o modelo, foi elaborada uma geometria 3D no programa Sketchup® para cada tipologia (Figura 2).

A geometria correspondente à tipologia 1 é basicamente um prisma retangular com duas saliências na parte superior, cujas dimensões são de 6,0 m x 11,0 m x 3,50 m de altura. Ela está conformada por um nível, com uma laje aligeirada com tijolos como cobertura, paredes de cobogós, na parte superior e tijolo furado na parte inferior, uma chaminé sobre a zona de secagem e uma moega seca sobre a laje.

A geometria da tipologia 2 apresenta uma planta de 9,10 m x 10,05 m, com paredes de tijolo furado e dois tipos de cobertura: uma de laje aligeirada com tijolos, onde a altura é de 3,60 m, e uma de fibrocimento, cuja altura é de 3,80 m. Esta construção faz parte de um conjunto de construções adossadas e dispostas de forma escalonada.

A geometria da tipologia 3 tem uma planta retangular de 5,10 m x 14,52 m, dividida em três desníveis, com pés-direitos de 2,40 m, 1,90 m e 2,45 m na ordem ascendente, adotando uma forma escalonada. Nesta tipologia as paredes são de tijolo furado revestido de azulejo e argamassa, enquanto a cobertura é de alumínio na parte inferior e de laje aligeirada com tijolo no desnível superior.

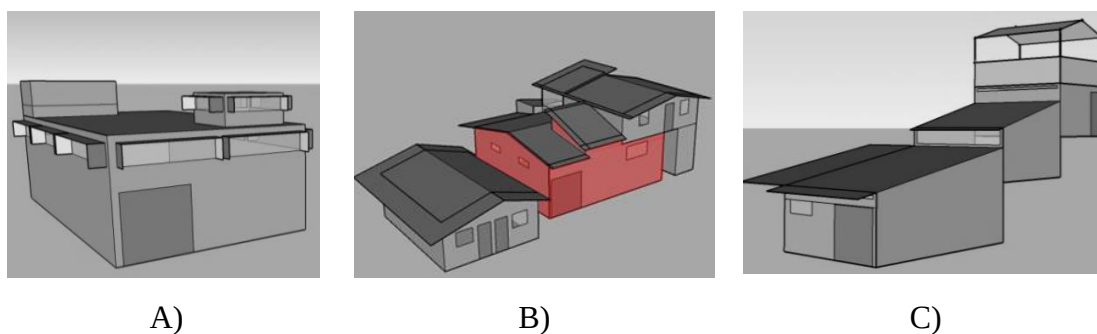


Figura 2 – Geometrias 3D das três tipologias de instalações para processamento úmido de café: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

Foi utilizado o arquivo climático da cidade de Medellín, por ser a fonte de dados meteorológicos mais completa e próxima a todas as instalações em estudo.

Cada instalação foi analisada como uma zona térmica independente. Na criação das zonas térmicas foi utilizado o plug-in Open Studio do EnergyPlusTM, com o fim de gerar arquivos idf para cada construção. Essas zonas têm um grupo de objetos (Zona, BuildingSurface) que descrevem as características térmicas da zona, assim como os detalhes de cada superfície modelada (UNITED STATES, 2014).

Na avaliação das propriedades térmicas dos materiais compostos das construções foi utilizado o método de simplificação de camadas de materiais (BRASIL, 2013), para cálculo da espessura e resistência térmica equivalente (LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEE, 2014). As propriedades térmicas de alguns materiais de construção utilizados nas três tipologias são apresentadas na Tabela 1.

Para simplificar os dados de entrada da tipologia 1, no tocante às aberturas constituídas por cobogós, na realidade, elas foram construídas como janelas, com a área efetiva dos cobogós, adicionando proteções solares para simular a interferência com a luz.

Cada tipologia conta com uma massa de material, composta de tijolo e, ou, concreto, representada em tanques de fermentação, classificador hidráulico e escadas, que foi quantificada e adicionada à parede imediata, com o fim de considerar o efeito da sua inércia térmica.

Tabela 1 – Propriedades térmicas de materiais

Material	$\rho(\text{kg.m}^{-3})$	$\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{°K}^{-1})$	$C_p(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1})$
Argamassa	2000	1.15	1.00
Concreto	2200	1.75	1.00
Tijolo	2200	0.95	0.84
Fibrocimento	1600	0.65	0.84
Cerâmica	1600	0.90	0.92
Aço-Ferro	7800	55	0.46

Fonte: NBR-15220 (ABNT, 2005).

Para o cálculo do calor gerado dentro da construção e o balanço de energia feito pelo programa, cuja equação geral é representada na Equação 1, foi inserido o valor do calor gerado pelos equipamentos de processamento de café (máquinas de despulpamento, lavagem hidráulica e secagem mecânica) e pela iluminação (Tabela 2), bem como o calor gerado do metabolismo humano. A energia metabólica que o corpo humano gasta durante a realização das atividades físicas varia conforme a pessoa, a atividade e as condições de trabalho (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2015). Neste estudo foi usado o valor de 440 Kcal/h (512 W), já que, de acordo com a NR 15 (BRASIL, 2011), corresponde a um trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos, o qual é característico do processamento do café nas três tipologias.

$$\frac{C_z dT_z}{dt} = \sum_{i=1}^n \dot{Q}_i + \sum_{i=1}^n h_i A_i (T_{si} - T_z) + \sum_{i=1}^n \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z) + \dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z) + \dot{Q}_{sys} \quad [\text{Eq. 1}]$$

em que $\sum_{i=1}^n \dot{Q}_i$ é a soma das cargas internas convectivas; $\sum_{i=1}^n h_i A_i (T_{si} - T_z)$, transferência de calor convectiva das superfícies da zona; $\dot{m}_{inf} C_p (T_{\infty} - T_z)$, calor transferido pelas frestas; $\sum_{i=1}^n \dot{m}_i C_p (T_{zi} - T_z)$, transferência de calor devido à mistura inter-zonas; $\dot{Q}_{sys}$, saída

de sistemas de ar; $\frac{C_z dT_z}{dt}$, energia armazenada; C_z , $\rho_{air} C_p C_T$; ρ_{air} , densidade do ar da zona; C_p , calor específico do ar da zona; e C_p , multiplicador da capacidade de calor sensível.

O combustível usado no trocador de calor da tipologia 1 foi de casca de café, com consumo de 0,352 kg por kg de café pergaminho seco e poder calorífico de 17.936 kJ.kg-1. Na tipologia 2 o combustível usado foi gás, com consumo de 0,058 kg por kg de café pergaminho seco e poder calorífico de 47.488,4 kJ.kg-1. Enquanto na tipologia 3, o trocador de calor funciona com lenha e carvão, porém, para facilitar os cálculos, foi considerado o carvão, com consumo de 0,224 kg por kg de café pergaminho seco e poder calorífico de 33.440 kJ.kg-1.

Tabela 2 – Potências dos equipamentos no processamento do café nas tipologias em estudo

Equipamento	Potência (W)
Despolpamentora	3357
Motor secadora	2238
Motobomba*	456
Luminárias	600

Legenda: * Unicamente presente na Tipologia 3.

Os padrões de uso inseridos no EnergyPlus™ para as simulações podem ser vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Padrões de uso nas simulações das três tipologias de instalações para processamento úmido de café

Horário	Operário do processamento úmido do café	Alimentação de combustível da secadora	Secagem mecânica de café	Despolpado de café	Lavagem de Café	Classificação hidráulica de café	Baixar camada de café	Embalagem	Luminárias
00:00-07:00	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
07:00-07:15	On	On	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
07:15-08:00	On	Off	On	On	Off	Off	Off	Off	Off
08:00-09:00	Off	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
09:00-10:00	On	Off	On	On	Off	Off	Off	Off	Off
10:00-12:00	On	Off	On	Off	On	Off	Off	Off	Off
12:00-12:45	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	Off	Off
12:45-13:00	On	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
13:00-14:00	Off	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
14:00-14:15	On	On	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
14:15-17:00	On	Off	On	Off	Off	On	Off	Off	Off
17:00-17:45	On	Off	Off	Off	Off	Off	On	Off	On
17:45-19:00	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off	On	On
19:00-24:00	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

B) Dados de saída da simulação segundo o modelo aplicado

Foram extraídos os resultados tanto de temperatura média quanto da umidade relativa média do ar, das simulações realizadas com cada tipologia, segundo o modelo aplicado. As médias extraídas correspondem aos dados das mesmas variáveis ambientais simuladas por um período de três dias; o software fornece um dado de temperatura e outro de umidade relativa do ar a cada hora, por cada instalação.

3) Verificação e validação do modelo de simulação aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café

Os resultados do modelo de EnergyPlusTM, aplicado nas três tipologias, foram verificados e validados com os correspondentes dados experimentais de temperatura e umidade relativa do ar descritos no item 2.2.1 deste capítulo.

Para realizar essa verificação, foi calculado o erro quadrado médio normal (Normal Mean Square Error – NMSE, em inglês), recomendado pela American Society For Testing Materials – ASTM (2002) (Equação 2). Para isso, foi levado em conta que valores de NMSE menores que 0,25 são considerados aceitáveis e bons indicadores de concordância; mais perto de zero, a concordância entre os valores experimentais e os valores simulados aumenta.

$$NMSE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(Y_{pi} - Y_{mi})^2}{Y_{pi} Y_{mi}} \quad [\text{Eq. 2}]$$

em que Y_{pi} é o valor predito; Y_{mi} , valor medido; e n , número de dados.

2.2.2. Análise do IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Para analisar o IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café aplicando o modelo de simulação, foi utilizada a Equação 3, apropriada para avaliação de ambientes internos (sem carga solar), de acordo com o estabelecido pela NR 15, anexo n. 3 (BRASIL, 2011).

$$IBUTG = 0,7 \, tbn + 0,3 \, tg \quad [\text{Eq. 3}]$$

em que tbn é temperatura de bulbo úmido natural, °C; e tg , temperatura de globo negro, °C.

As simulações foram feitas para todo o mês de novembro, de hora em hora. Com os dados de saída do EnergyPlus™, o software não fornece a possibilidade de obter o IBUTG, razão pela qual ele foi calculado a partir de outros dados de saída, que podem ser obtidos através do software.

Concretamente, para obter a temperatura de globo negro (tg), foi indispensável calculá-la a partir da Equação 4, correspondente à temperatura média radiante (TRM) (FANGER, 1972). Nessa equação, a TRM e a tbs são dados de saída fornecidos pelo software. A velocidade do ar dentro das instalações, que faz parte desta equação foi obtida a partir dos dados do volume de infiltração (m³/h) de cada zona térmica (cada instalação), sendo este último parte das saídas do EnergyPlus™.

Para obter a Temperatura Bulbo Úmido, foi utilizada a Equação 5 (STULL, 2011), onde foram aproveitados os dados de Tbs e de umidade relativa do ar, que são proporcionados pelo EnergyPlus™ como dados de saída.

$$TRM = T_g + 1.9\sqrt{V_a} (T_g + T_{bs}) \quad [\text{Eq. 4}]$$

em que T_g é temperatura de globo, °C; T_{bs} , temperatura de bulbo seco, °C; e V_a , velocidade do ar, m/s.

$$T_{bn} = T_{atan} \left[0,151977(UR\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}} \right] + \text{atan}(T_{bs} + UR\%) - \text{atan}(UR\% - 1,676331) + 0,00391838(UR\%)^{\frac{3}{2}} \text{atan}(0,023101UR\%) - 4,686035$$

[Eq. 5]

em que T_{bn} é temperatura de bulbo úmido, °C; e $UR\%$, umidade relativa do ar, °C.

A fim de estabelecer os limites de tolerância dos trabalhadores para a exposição ao calor em IBUTG (°C), foi considerada a taxa metabólica de 440 Kcal/h (512 W), para um trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos, que é o mais repetitivo nas tipologias em estudo e é catalogado como pesado, de acordo com as taxas metabólicas definidas por atividade na NR15 (BRASIL, 2011). Assim, também foi levado em consideração que o limite para o IBUTG de uma atividade pesada, desenvolvida de forma contínua em uma hora, é de 25°C (BRASIL, 2011).

Foram elaborados gráficos de caixa para comparar o comportamento do IBUTG dentro das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação, bem como análise de variância com delineamento inteiramente casualizado a 1% de probabilidade, acompanhada de análise de médias pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade, cujos tratamentos foram as três tipologias. Os resultados foram confrontados com o limite do IBUTG de 25°C.

2.2.3. Análise do comportamento higrotérmico nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Foram realizadas comparações do comportamento higrotérmico nas três tipologias aplicando o modelo de simulação, e do ambiente externo, a partir dos dados horários do mês de novembro, quando se tem a maior produção do período de colheita de café. Os dados do ambiente externo foram fornecidos pelo arquivo climático da cidade de Medellín, próxima às localizações das três tipologias em estudo. Para realizar tais comparações, foram elaborados gráficos de caixa de temperatura e de umidade relativa do ar dentro das tipologias, assim como análise de variância com delineamento inteiramente casualizado a 1% de probabilidade e teste de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, em que os tratamentos foram constituídos pelo ambiente externo (testemunha) e pelas três tipologias, para analisar as mesmas variáveis.

Os valores dos gráficos de caixa foram confrontados com os de temperatura e umidade relativa do ar recomendados por Puerta Quintero (2003), de 20°C e entre 65% e 70%, respectivamente, para conservar a qualidade do café pergaminho seco armazenado.

2.2.4. Análise do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Foi feita uma comparação do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, durante o mês de novembro, aplicando o modelo de simulação do EnergyPlusTM. Nessa comparação, foram consideradas as potências dos equipamentos que funcionam a partir de energia elétrica, assim como as dos que funcionam com combustível, seu poder calorífico e a quantidade que demandam para secar o café ao ano em cada tipologia¹. Foram elaboradas tabelas com os dados das três tipologias, indicando o consumo de energia e o custo que demanda o tipo de energia que foi determinante nesse consumo.

¹ Ver dados de entrada para o modelo de simulação no presente capítulo.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Estudo de temperatura e umidade relativa do ar através de mapeamento, a partir de dados experimentais

Na Figura 3, pode-se observar o mapa das temperaturas médias do ar, com dados de três dias, no horário de trabalho, nas tipologias 1, 2 e 3.

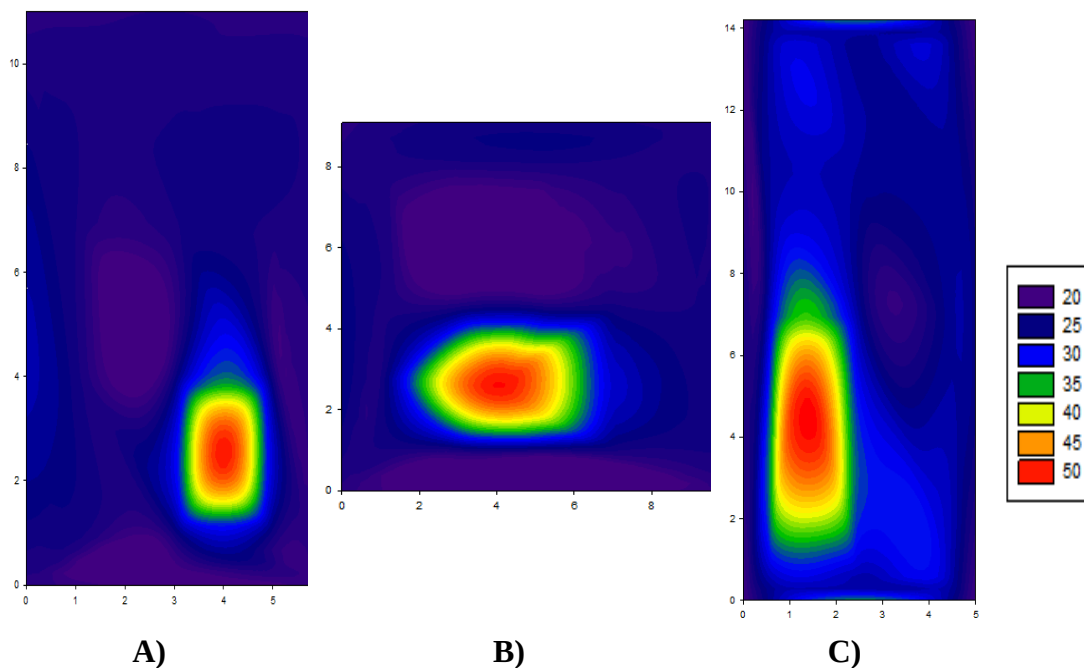


Figura 3 – Mapas de temperaturas médias do ar, de dados de três dias, no horário de trabalho, nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

De acordo com a Figura 3-A, as maiores temperaturas da tipologia 1 foram encontradas perto da zona da máquina de secagem, sendo predominantes temperaturas entre 20°C, nos pontos mais frescos, e 25°C. Os pontos mais frescos são influenciados pelo ar que entra pelo portão de acesso à instalação².

Conforme a Figura 3-B, na tipologia 2 são observadas temperaturas entre 20 e 25°C na maior parte da sua área. As zonas mais frescas têm incidência da ventilação natural, aquela que entra pela janela e pelas frestas do portão na fachada principal, a que entra pelas janelas laterais e pela porta do fundo, e a que entra pela porta lateral, onde, por haver aberturas localizadas nos quatro lados da construção, podem gerar ventilação

² Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 1 no capítulo 1, item 4.1.

cruzada constante. As temperaturas maiores que 25°C foram encontradas ao redor da zona da máquina secadora de café, com concentrações máximas de temperatura na zona propriamente da máquina³.

Com base na Figura 3-C, pode-se perceber que, como acontece nas tipologias 1 e 2, na tipologia 3 a zona da máquina de secagem de café apresentou as maiores temperaturas. No resto da instalação, as temperaturas predominantes foram aquelas próximas de 30°C⁴.

Lembrando a configuração escalonada desta instalação, com aberturas conformadas pelos seus desníveis, projetadas em sentido contrário ao dos fluxos no interior (do nível inferior até o superior), é possível inferir que essa situação leva a que o percurso desses fluxos coincida com as temperaturas maiores.

Notam-se nas três instalações diferenças entre as temperaturas encontradas no mesmo ambiente, que ultrapassaram 4°C, ao contrário ao recomendado por Iida (2005). No entanto, nas tipologias 1 e 2, as menores temperaturas, predominantemente entre 20°C e 25°C, correspondem adequadamente às temperaturas recomendadas para trabalhadores com requerimentos físicos maiores do que os sedentários, entre 14°C e 25°C (COLOMBIA, 1997). A tipologia 3 representou o caso crítico, com temperaturas acima do recomendado, predominantemente em torno de 30°C.

No tocante à temperatura recomendada para manter a qualidade do café, de até 20°C (PUERTA QUINTERO, 2003), é evidente que nenhuma das tipologias a atingiu durante a coleta de dados.

Na Figura 4, pode-se observar o mapa da umidade relativa média do ar, com dados de três dias, no horário de trabalho, nas tipologias 1, 2 e 3.

³ Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 2 no capítulo 1, item 4.2.

⁴ Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 3 no capítulo 1, item 4.3.

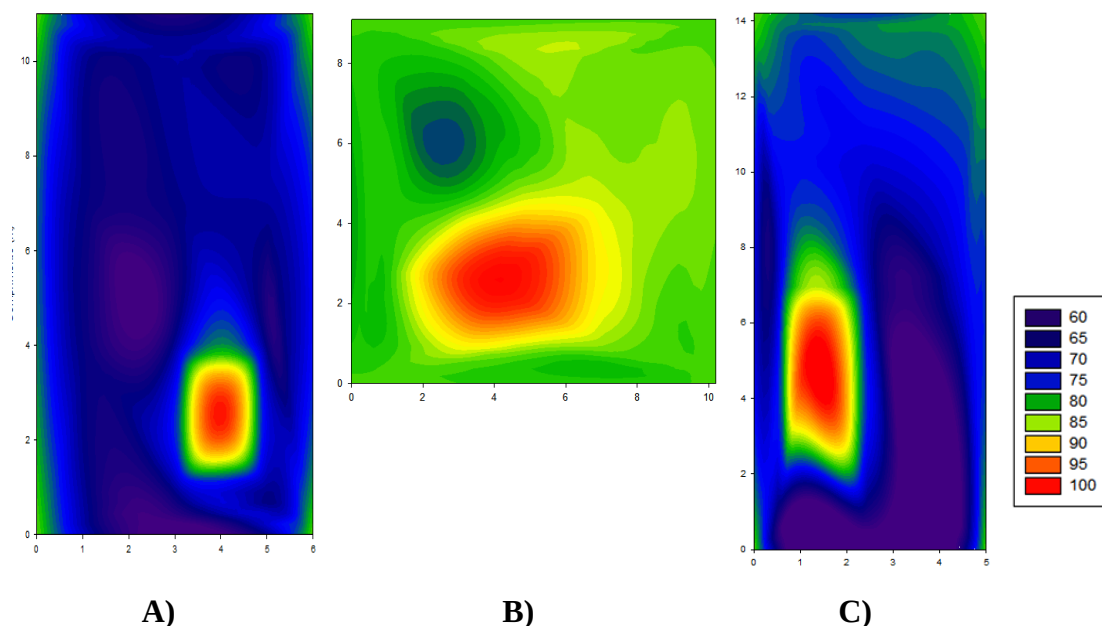


Figura 4 – Mapas da umidade relativa média do ar, com dados de três dias, no horário de trabalho, nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

De acordo com o mapa da Figura 4-A, a umidade relativa do ar dentro da tipologia 1 encontra-se entre 60% e 75%; os pontos com os valores mais próximos a 60% se encontram influenciados pelo ar que entra pelo portão de acesso, e os pontos com valores próximos a 75% estão perto das paredes da instalação e das paredes da máquina de secagem. Valores maiores que 75% de umidade relativa são encontrados nas esquinas da instalação, já que são áreas mais difíceis de ventilar, e na zona da máquina de secagem, por ser um emissor potencial de umidade⁵.

Segundo a Figura 4-B, a tipologia 2 encontra-se bastante afetada pela umidade, com valores de umidade relativa no ar principalmente entre 80% e 85%. Apenas uma pequena área encontra-se abaixo dessa faixa. Entretanto, as concentrações maiores de umidade nesta tipologia foram encontradas na zona da máquina de secagem, devido à emissão própria da máquina no processo de secagem. Contudo, a fraca transição das cores desde a secadora para seu entorno imediato, sugere possíveis escapes de umidade da máquina, talvez através das suas portas, aumentando a umidade da instalação⁶.

Conforme o mapa da Figura 4-C, os maiores valores de umidade relativa na tipologia 3, entre 80% e 100%, estão concentrados na zona da secadora de café; neste

⁵ Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 1 no capítulo 1, item 4.1.

⁶ Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 2 no capítulo 1, item 4.2.

caso, a direção do fluxo da umidade também se vê influenciada pela configuração escalonada da instalação. Essa configuração facilita a ventilação térmica, e esta faz com que o ar que sai da máquina, o qual, além de quente, é úmido, tenda a buscar os pontos mais elevados da construção. Essa situação sugere que as aberturas para a evacuação do ar quente e úmido não foram adequadamente projetadas, seja pela área insuficiente ou, principalmente, pela sua localização em sentido contrário ao da direção dos fluxos⁷.

Segundo a umidade relativa do ar recomendada para trabalhadores com requerimentos físicos maiores do que os sedentários, entre 30% e 70% (COLOMBIA, 1997), a tipologia 1 está mais próxima de atender ao requerimento das tipologias 2 e 3, sendo a tipologia 2 o caso mais crítico. O mesmo acontece com os requerimentos para conservar a qualidade do café (entre 65% e 70% segundo PUERTA QUINTERO, 2003).

3.1. Estudo de simulação computacional

3.1.1. Elaboração, verificação e validação do modelo de simulação aplicado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café

Na Tabela 4 é possível observar a comparação de temperatura e umidade relativa do ar entre os dados experimentais e os dados das três tipologias, segundo o modelo de simulação aplicado.

Tabela 4 – Comparação de temperatura e umidade relativa do ar entre os dados experimentais e os dados das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, segundo o modelo de simulação aplicado

		Temperatura de ar (°C)		Umidade relativa do ar (%)	
		Temperatura medida	Temperatura simulada	Umidade relativa medida	Umidade relativa simulada
Tipologia 1	Média	21,6	22,7	74,1	73,7
	NMSE	0,02089		0,01455	
Tipologia 2	Média	20,0	21,7	86,1	79,0
	NMSE	0,01776		0,02256	
Tipologia 3	Média	25,7	23,2	79,6	74,0
	NMSE	0,03372		0,02670	

⁷ Para compreender melhor, ver projeto da tipologia 3 no capítulo 1, item 4.3.

Os resultados evidenciam concordância entre os dados de temperatura e umidade relativa do ar coletados para este estudo e os dados da simulação das três tipologias segundo o cálculo do NMSE, uma vez que todos têm valores abaixo de 0,25, de acordo com o recomendado pela ASTM (2002).

Por conseguinte, é possível afirmar que o modelo de simulação proposto pode prever o comportamento higrotérmico dentro das três instalações, inclusive durante períodos maiores que o período experimental, sobretudo na temporada de colheita, o que pode facilitar a tomada de decisões para melhorar o comportamento de ambas as variáveis ambientais dentro dessas tipologias.

3.1.2. Análise do IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

O comportamento do IBUTG, calculado com base nos resultados das simulações nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, pode ser observado na Figura 5.

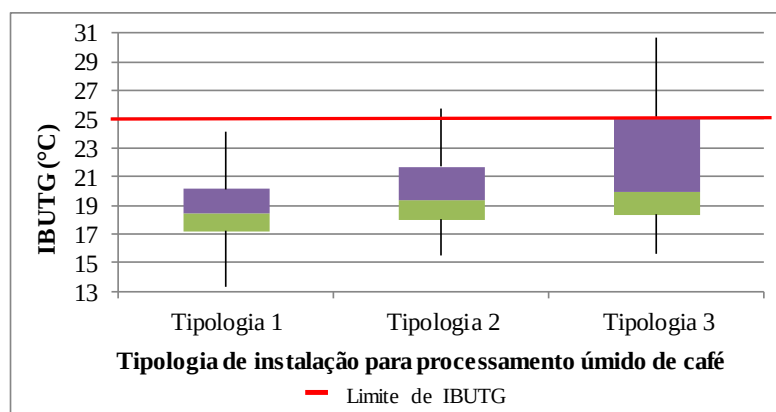


Figura 5 – Comportamento do IBUTG nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, segundo os resultados do modelo de simulação aplicado.

A maior parte dos dados de IBUTG, nos três modelos, encontrou-se abaixo do limite de 25°C; a tipologia 1 foi a que apresentou os menores valores, seguida das tipologias 2 e 3, nessa ordem.

Concretamente, a tipologia 1 teve a mediana de 18,4°C, comparada com 19,4°C e 19,9°C das tipologias 2 e 3, respectivamente; na tipologia 1, os quartis 1 e 3 foram de 17,2°C e 20,1°C, respectivamente, frente a 18,0°C e 21,7°C da tipologia 2 e 18,4°C e 25,2°C da tipologia 3, respectivamente; e, por último, na tipologia 1, a mínima e a máxima

foram de 13,3°C e 24,2°C, respectivamente, frente a 15,5°C e 25,8 da tipologia 2 e 15,7°C e 30,7°C da tipologia 3, respectivamente. Notam-se poucos dados que ultrapassam o limite do IBUTG na tipologia 2 e cerca de 25% dos dados na tipologia 3.

Os maiores valores na tipologia 2, mais sobretudo na tipologia 3 poderiam ser atribuídos à combinação de alta temperatura no ar com alta umidade, o qual dificulta as perdas de calor por evaporação do suor, ocasionando estresse térmico (LAMBERTS; DUTRA; RUTTKAY, 2014). Tanto a temperatura quanto a umidade relativa do ar das tipologias segundo o modelo de simulação aplicado, são avaliadas no item 3.3 deste capítulo.

A análise de médias do IBUTG, calculado a partir dos resultados das simulações para as três tipologias de instalação para processamento úmido de café, é apresentada na Tabela 5.

Tabela 5 – Teste de médias do IBUTG nas tipologias de instalação para processamento úmido de café, segundo os resultados do modelo de simulação aplicado

Tratamento	n	Média	Desvio-Padrão
Tipologia 1	720	18.78 a	2.01
Tipologia 2	720	19.91 b	2.32
Tipologia 3	720	21.63 c	4.20

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 164,63$).

Encontrou-se diferença significativa desse índice entre as tipologias, ratificando a média menor na tipologia 1, seguida da tipologia 2, e as maiores na tipologia 3. Não obstante, cabe ressaltar que com predominância de valores inferiores ao limite de 25°C nas três tipologias, o IBUTG não representa um problema de difícil solução.

3.1.3. Análise do comportamento higrotérmico nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café aplicando o modelo de simulação

Na Figura 6 pode-se observar o comportamento da temperatura das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, segundo o modelo EnergyPlus™.

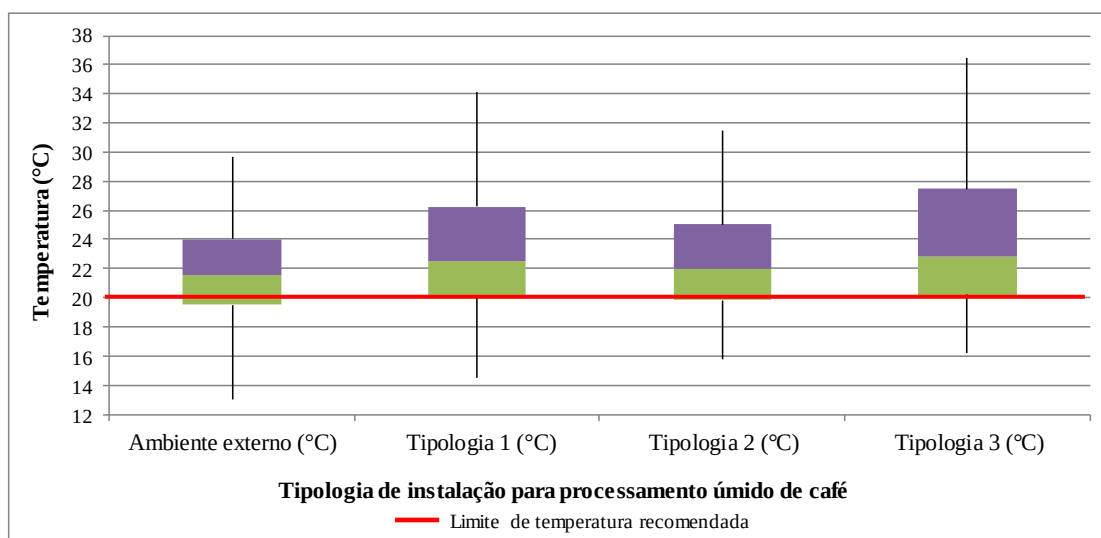


Figura 6 – Comportamento da temperatura das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação.

Os valores de temperatura nas tipologias com aplicação do modelo de simulação têm maior porcentagem de dados acima do limite recomendado (20°C). A tipologia 2 foi a que teve menor variedade térmica e tendência a apresentar as menores temperaturas, com mediana de 22°C, frente a 22,6°C e 22,8°C das tipologias 1 e 3, respectivamente; com quartis 1 e 3 de 19°C e 25°C, respectivamente, em comparação com 20°C e 26,3°C na tipologia 1 e 20,2°C e 27,5 na tipologia 3; e, finalmente, com mínima e máxima de 15,8°C e 31,5°C, respectivamente, comparadas com 14,5°C e 34,1°C na tipologia 1 e 16,2°C e 36,5°C na tipologia 3, sendo esta última a que apresentou as maiores temperaturas.

Na tipologia 2, o uso de gás como combustível no trocador de calor da secadora, o grande volume de controle da construção e a pouca radiação solar que recebe por causa das construções imediatas podem ser as causas das menores temperaturas. Na tipologia 3, o combustível da secadora, com base em lenha ou carvão, a pouca altura dos pés-direitos e o uso de alumínio na cobertura, material que não é bom isolante térmico, fazem com que as temperaturas sejam maiores. Contudo, a tipologia 1 apresentou comportamento intermediário, com uso de casca de café como combustível da secadora, cobertura de laje e com a maior área de ventilação, que porém não é suficiente para manter a temperatura dentro do limite⁸.

⁸ Para compreender melhor, ver projeto das três tipologias no capítulo 1, itens 4.1, 4.2 e 4.3.

Na Tabela 6 é apresentada a análise de médias do comportamento da temperatura do ar nos modelos das tipologias de instalação para processamento úmido de café em estudo. Nota-se que existe diferença significativa na temperatura do ar entre os modelos das três tipologias, e entre eles e o ambiente externo, corroborando as menores temperaturas na tipologia 2 e as maiores na tipologia 3.

Tabela 6 – Teste de médias do comportamento da temperatura das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Tratamento	n	Média	Desvio-Padrão
Ambiente externo	721	21.89 a	2.959
Tipologia 1	721	23.22 b	4.006
Tipologia 2	721	22.51 c	3.368
Tipologia 3	721	24.07 d	4.845

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 42,689$).

Na Figura 7 é possível observar o comportamento da umidade relativa do ar das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, de acordo com o modelo EnergyPlus™.

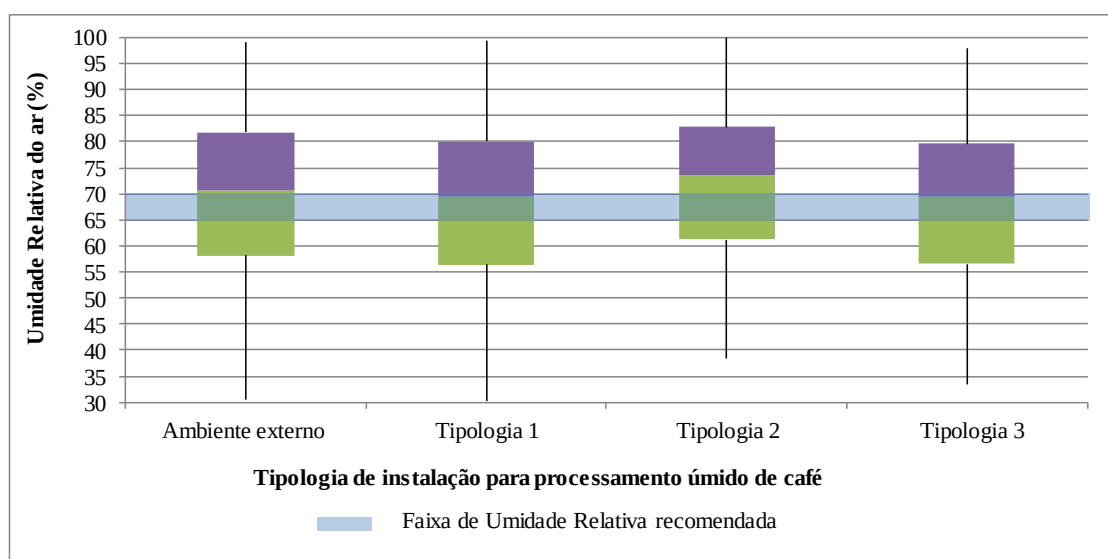


Figura 7 – Umidade relativa das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação.

A figura mostra a ampla faixa de umidade relativa elevada no ambiente externo, com valores perto de 100%, devido às chuvas durante a época da colheita. Essa variabilidade se apresenta em todas as tipologias, fazendo com que a maior parte dos dados esteja fora da faixa recomendada (entre 65% e 70%).

A tipologia 3 apresentou os menores valores de umidade relativa do ar, com mediana de 69,4%, comparada com 69,5% e 73,4% das tipologias 1 e 2, respectivamente; com quartis 1 e 3 de 56,6% e 79,7%, respectivamente, frente a 56,4% e 80,1% na tipologia 1 e 61,2% e 82,9% na tipologia 2, respectivamente; e, finalmente, com mínima e máxima de 33,4% e 98,1%, respectivamente, comparadas com 30,3% e 99,5% da tipologia 1 e 38,4% e 100% da tipologia 2, constituindo-se a tipologia 2 naquela com os maiores valores de umidade relativa do ar.

Na tipologia 3, as maiores temperaturas diminuem a densidade do ar, aumentando a capacidade de conservar umidade; não obstante, na tipologia 2 acontece o contrário, o que se soma ao fato de haver aberturas para ventilação insuficientes para o volume da construção. Já na tipologia 1 observa-se comportamento similar ao do ambiente externo, mas 50% dos dados intermediários são menores devido à temperatura interna maior do que a ambiente.

Na Tabela 7 encontra-se a análise de médias do comportamento da umidade relativa do ar nas tipologias de instalação para processamento úmido de café em estudo, aplicando o modelo de simulação. Encontrou-se diferença significativa na umidade relativa do ar entre a tipologia 2 e as tipologias 1 e 3 e o ambiente externo. Segundo a análise de médias, a tipologia 2 apresentou os maiores valores de umidade relativa do ar, estando acima da faixa recomendada para conservar a qualidade do café, enquanto as tipologias 1 e 3 mostraram comportamento similar ao do ambiente externo, com médias menores, estando inclusive dentro da faixa recomendada. Não obstante, é necessário lembrar que dentro dessas instalações há momentos em que a umidade relativa do ar ultrapassa essa faixa, com consequências negativas para a qualidade do café.

Tabela 7 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Tratamento	n	Média	Desvio-Padrão
Ambiente externo	721	69.29 a	14.537
Tipologia 1	721	68.00 a	14.872
Tipologia 2	721	72.02 b	13.973
Tipologia 3	721	67.88 a	14.55

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 12,685$).

3.1.4. Análise do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação

Na Tabela 8 encontram-se os dados do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação para o mês de novembro.

Tabela 8 – Comparação do gasto energético nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café, aplicando o modelo de simulação para o mês de novembro.

Equipamento	Consumo de Energia (KWh)		
	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Trocador de calor	213.079.680,00	93.054.348,00	252.806.400,00
Despolpamentora	201.420,00	201.420,00	201.420,00
Motor secadora	738.540,00	738.540,00	738.540,00
Motobomba	-	-	54.720,00
Luminárias	36.000,00	36.000,00	36.000,00
Consumo total de energia	214.055.640,00	94.030.308,00	253.837.080,00

Em razão de as instalações não serem climatizadas e de utilizarem as mesmas máquinas, a diferença no consumo energético se dá pelo fato de estas utilizarem diferentes fontes de energia para a secagem do café (casca de café na tipologia 1, gás na tipologia 2 e carvão mineral na tipologia 3).

O trocador de calor que utiliza o gás como combustível é o mais eficiente, já que o gás permite secar a mesma quantidade de café que as demais tipologias, com menor consumo energético, contribuindo para que a temperatura da instalação não aumente consideravelmente. Entretanto, em construções isoladas das redes de gás, como o caso das tipologias avaliadas, o uso deste combustível pode resultar mais oneroso do que o uso dos outros dois tipos. Na Tabela 9 podem-se observar os custos, na Colômbia, dos combustíveis usados nas tipologias em estudo, O gás foi o combustível mais caro, seguido do carvão, e a casca de café foi o combustível economicamente mais viável, constituindo-se na segunda opção com relação aos efeitos térmicos.

Tabela 9 – Custos do combustível usado nas três tipologias de instalação para processamento úmido de café no mês de novembro

	Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
Tipo de combustível	Casca de café	Gás	Carvão
Custo em pesos colombianos	1.093.935,96	5.879.528,28	3.251.830,68

4. CONCLUSÕES

O estudo de temperatura e umidade relativa do ar através de mapeamento dos dados experimentais evidenciou problemas na tipologia 3 para atingir a temperatura e umidade relativa do ar recomendadas para os trabalhadores e para conservar a qualidade do café. Entretanto, as tipologias 1 e 2 apresentaram condições adequadas de temperatura unicamente para os trabalhadores, enquanto na umidade relativa ambas as tipologias estiveram predominantemente fora da faixa recomendada, sendo a tipologia 2 o caso mais crítico.

O modelo de simulação proposto pode prever o comportamento higrotérmico dentro das três tipologias de instalação para processamento úmido de café.

O limite do IBUTG não foi superado por nenhuma das três tipologias com aplicação do modelo de simulação; a tipologia 1 apresentou os menores valores, seguida das tipologias 2 e 3.

Na análise do comportamento higrotérmico nas três tipologias aplicando o modelo de simulação, a temperatura do ar esteve acima do limite recomendado; as tipologias 3 e 2 o caso mais e menos crítico, respectivamente. Na umidade relativa do ar,

as três tipologias estiveram principalmente fora da faixa recomendada; a tipologia 2 mostrou os maiores valores, seguida das tipologias 1 e 3, possivelmente influenciada pelo comportamento térmico.

O gasto energético das três tipologias, com aplicação do modelo de simulação, esteve determinado pelo tipo de combustível no trocador de calor das secadoras, enquanto sua disponibilidade determinou o custo econômico; o gás foi o mais eficiente energeticamente e de menor efeito sobre o ambiente térmico, porém a casca de café foi mais econômica e mais eficiente, comparada com o carvão.

5. REFERÊNCIAS

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS - ASTM. **Standard guide for statistical evaluation of indoor air quality models (D5157-97)**. 2.ed. West Conshohocken, PA, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR15220-2, de abril de 2005**. Desempenho térmico de edificações - parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

BITENCOURT, D.P.; RUAS, A.C.; MAIA, P.A. Análise da contribuição das variáveis meteorológicas no estresse térmico associada à morte de cortadores de cana-de-açúcar. **Cad. Saúde Pública**, v. 28, n. 1, p. 65-74, 2012.

BRASIL. **Norma Regulamentadora 15, de 08 de dezembro de 2011**. Regulamenta as atividades e operações insalubres. Brasília, DF, 2011.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Anexo V - Portaria n. 50, de 01 de fevereiro de 2013**. Brasília, DF, 2013.

BRE, F.; FACHINOTTI, V.D.; BEARZOT, G. Mecânica computacional. **Heat and Mass Transfer (A)**, v. 32, n. 37, 2013.

COLOMBIA. Ministério de Trabajo y Seguridad Social de Colombia. **Resolución 2.400 de 1979**. Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. 1979.

COLOMBIA. Ministério de Trabajo y Asuntos Sociales. **Real Decreto 486/1997, de 14 de abril, por el que se establecen las disposiciones mínimas de seguridad y salud en los lugares de trabajo**. 1997.

COUTO, H. de A. **Ergonomia aplicada ao trabalho**: o manual técnico da máquina humana. Belo Horizonte, MG: Ergo, 1995. v. 1, 353 p.

FANGER, P.O. **Thermal comfort analysis and application in environmental design**. New York, NY: MacGraw-Hill, 1972.

HERRERA, J.A.A. et al. Evaluación de estrés térmico en una empresa productora de alimentos en Córdoba-Colombia. **Revista Clepsidra**, v. 10, n. 19, p. 113-124, 2015.

IIDA, Itiro. **Ergonomia: projeto e produção**. 2.ed. São Paulo, SP: Edgard Blucher, 2005.

INTERNATIONAL COFFEE ORGANIZATION – ICO. **Total production by all exporting countries**. London, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 7243 - hot environments: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (wet bulb globe temperature)**. Geneva, Suíça, 1982.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEEE. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A.A.; GOULART, S. **Conforto e stress térmico**. Florianópolis, SC: LabEEE, 2011.

LAMBERTS, R.; DUTRA, L.; RUTTKAY, F.O.P. **Eficiência energética na arquitetura**. 3.ed. São Paulo, SP: Pro Livros, 2014.

LÓPEZ F., F. Secado de café en lecho fluidizado. **Ingeniería e Investigación**, v. 26, n. 1, p. 25-29, 2006.

NAVARRO, S.; NOYES, R.T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

NORTON, T. et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 1, p. 78-99, 2009.

OLIVEROS TASCÓN, Carlos E.; SANZ URIBE, Juan R.; RAMÍREZ GÓMEZ, Cesar A.; PEÑUELA MARTÍNEZ, Aída E. Aprovechamiento eficiente de la energía en el secado mecánico del café. **Avances Técnicos CENICAFÉ**, n. 380, p. 1-8, 2009.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of a thermal environment in two buildings for the wet processing of coffee. **DYNA**, v. 82, n. 194, p. 214-220, 2015.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of the internal environment of a post-harvest installation and a solar dryer of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 163-168, 2016.

PÉREZ RENDÓN, E.P.; RAMÍREZ BUILES, V.H.; PEÑA QUIÑONES, A.J. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. **Investigaciones Geográficas**, n. 89, p. 23-40, 2016.

PUERTA QUINTERO, G.I. Especificaciones de origen y buena calidad del café de Colombia. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 316, p. 1-8, 2003.

PUERTA QUINTERO, G.I. Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 371, p. 1-8, 2008.

SÁNCHEZ, L.M. La contabilidad en la conservación del paisaje cultural cafetero: retos y posibilidades. **Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**, v. 8, p. 57-70, 2016.

STULL, R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 11, p. 2267-2269, 2011.

TODD, N.; VALLERON, A.J. Space-time covariation of mortality with temperature: a systematic study of deaths in France, 1968-2009. **Environmental Health Perspectives**, v. 123, n. 7, p. 659, 2015.

UNITED STATES. Department of Energy. Energyplus. **The reference to EnergyPlus calculations**. Champaign, IL: University of Illinois, 2012. 847 p.

UNITED STATES. Department of Energy. Energyplus. **The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output**. Champaign, IL: University of Illinois, 2014.

CAPÍTULO 4 – OTIMIZAÇÃO DAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS EM UNIDADES DE PROCESSAMENTO ÚMIDO DE CAFÉ ATRAVÉS DE SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

RESUMO: Este estudo objetivou otimizar as condições ambientais em unidades de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia através de simulação computacional por meio de EnergyPlusTM e CFD. Foram realizadas simulações com EnergyPlusTM, para avaliar temperatura do ar, umidade relativa do ar e IBUTG, em três tipologias desse tipo de instalação durante o mês de maior produção de café. Essas tipologias foram modificadas na área de ventilação, no material de cobertura e no material de fechamento de cada um. As modificações deram lugar a dois grupos de projetos arquitetônicos (GP): GP1, com a distribuição arquitetônica original de cada tipologia; e GP2, com a divisão da planta arquitetônica original, gerando uma zona úmida, zona seca e zona de armazenagem independentes. Por meio do CFD, foi avaliada a distribuição da temperatura e umidade relativa do ar na zona de armazenagem de cada tipologia gerada no GP2. A otimização das condições ambientais nas instalações em estudo foi possível, visto que na análise da umidade relativa do ar, através das simulações com EnergyPlusTM das três tipologias com os tratamentos propostos, as médias em geral estiveram dentro da faixa recomendada para conservar a qualidade do café na zona de armazenagem; na análise da temperatura do ar, os resultados das simulações nas três tipologias com o mesmo software, superam em geral o limite recomendado, sobretudo na zona de armazenamento. Contudo, as simulações com CFD mostraram que, apesar dos resultados com EnergyPlusTM, a distribuição espacial da temperatura nessa zona permite armazenar o café em condições adequadas para as tipologias 1 e 3; na análise do IBUTG as três tipologias apresentaram bom comportamento no GP1 e GP2. O melhor comportamento nos três itens avaliados foi observado na tipologia 1. A divisão e separação espacial das tipologias estudadas em zona úmida, zona seca e zona de armazenagem, colocando o trocador de calor fora da instalação, foram determinantes para a otimização das condições ambientais dessas instalações. Essa pode ser uma proposta viável para melhorar o ambiente do trabalhador e do café nessas instalações representativas das tipologias arquitetônicas de unidades de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia.

Palavras-chave: EnergyPlusTM, CFD, qualidade do café, IBUTG.

1. INTRODUÇÃO

Na Colômbia as condições bioclimáticas das instalações para processamento úmido de café, podem ser decisivas tanto para a conservação da qualidade do café, quanto para o conforto dos trabalhadores, pelo fato de ele ser processado por via úmida, finalizando com a secagem; quando esta é mecânica, grande quantidade de calor e vapores são gerados pelas máquinas para o ambiente interno (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016).

Nesse país, os produtores afastados frequentemente armazenam o café em pergaminho seco por longos períodos antes que seja transportado para os pontos de venda (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016). Em muitas destas unidades de processamento úmido de café é comum haver zonas destinadas à armazenagem do grão com ausência de divisórias entre ela e as demais zonas, o que pode prejudicar a qualidade do café pergaminho seco.

Puerta Quintero (2008) afirma que ambientes com alta temperatura e umidade durante a armazenagem podem estragar fisicamente os grãos e propiciar sua decomposição. Segundo Navarro e Noyes (2001), temperaturas superiores a 50°C podem “matar” a semente de café e iniciar seu processo de decomposição, enquanto ambientes com umidade relativa do ar entre 70% e 80% propiciam o surgimento de fungos e podem desenvolver acumulação de umidade nos grãos armazenados, e umidades acima de 85% causam proliferação de leveduras e bactérias.

Segundo Puerta Quintero (2003), as condições adequadas para conservar a qualidade do café pergaminho seco armazenado na Colômbia durante o máximo de seis meses, com umidade entre 10% e 12% no grão, consistem de temperatura inferior a 20°C e umidade relativa no ar entre 65% e 70%. Condições ambientais diferentes afetam a qualidade da bebida.

Por sua vez, o processamento de café por via úmida na Colômbia exige dos operários grandes esforços físicos, que, somados às condições ambientais, podem causar estresse térmico, com consequentes efeitos negativos na saúde e na produção (LAMBERTS; XAVIER; GOULART, 2011), além dos riscos laborais que podem produzir (BITENCOURT; RUAS; MAIA, 2012).

O uso do Índice de Bulbo Úmido e Termômetro de Globo (IBUTG) foi estabelecido para avaliar o desempenho humano no trabalho em condições de exposição ao calor (COLOMBIA, 1979; ISO, 1982; NR 15, 2011), indicando inclusive os parâmetros para seu cálculo e porpondo os seus limites.

O IBUTG funciona como um indicador que considera a temperatura do ar, o metabolismo, o calor radiante, a velocidade e a umidade relativa do ar como os principais geradores da sobrecarga térmica (COUTO, 1995).

Há poucos estudos com análises do ambiente interno em unidades para processamento úmido de café que incluam propostas de otimização das condições ambientais para a armazenagem do café e para o trabalhador. Alguns estudos iniciais destacam problemas na ambiência para conservar a qualidade do café nesse tipo de

instalação (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2015, 2016); alguns, além disso, geram propostas, como a ventilação natural (OSÓRIO HERNANDEZ et al., 2016), porém o conforto térmico dos trabalhadores nessas construções é ainda um tema inexplorado, constituindo-se, segundo Herrera et al. (2015), em um problema generalizado na indústria alimentar, principalmente na América Latina e no Caribe, onde ainda não existem estudos confiáveis que mostrem o panorama das condições de trabalho nesse setor.

Para Norton et al. (2009), o uso de modelagem matemática e computacional para analisar as condições de ambiência e sugerir soluções dentro das construções agroindustriais, é cada vez mais frequente e importante. Essas ferramentas estão se tornando muito vantajosas nas fases de projeto e avaliação das construções, pelo fato de estas consistirem de aspectos complexos, como fluxos de energia transientes, padrões de ocupação estocásticos etc., que os métodos de projeto tradicionais baseados na experiência ou experimentação não podem quantificar satisfatoriamente (BRE; FACHINOTTI; BEARZOT, 2013).

Entre essas ferramentas, o EnergyPlus™ (UNITED STATES, 2012), que é um software de código aberto desenvolvido pelo U.S. Department of Energy (DoE), pode, entre outras coisas, fazer uma abordagem simples das condições ambientais dos edifícios, através da chamada técnica multi-zona (também chamado de método nodal).

Esta técnica considera cada zona de um edifício como um volume homogêneo caracterizado por variáveis de estado uniformes. Assim, uma zona é aproximada a um nó, que é descrito por uma única temperatura, pressão, concentração etc. Geralmente, um nó representa um quarto, uma parede ou então o exterior do edifício, mas pode ser mais específico, como cargas (ganhos por ocupação interna ou equipamentos, sistema de aquecimento/arrefecimento). As equações de transferência térmica são resolvidas para cada nó do sistema. Nesses termos, o método nodal usado no EnergyPlus™ pode ser considerado uma abordagem unidimensional (FOUCQUIER et al., 2013), que simplifica a simulação diminuindo o tempo de computação, com capacidade de simular até um ano completo, com dados climáticos para cada hora do ano.

Entretanto, a abordagem mais completa na simulação bioclimática de um edifício é o método da Dinâmica de Fluidos Computacional (CFD). Por ser uma abordagem microscópica da modelagem das trocas de calor e massa, permite observar os detalhes do campo de fluxo. Baseia-se na decomposição de cada zona da construção em um grande número de volumes de controle com uma malha global homogênea ou

heterogênea. Por conseguinte, a técnica de CFD é reconhecida como uma abordagem tridimensional (FOUCQUIER et al., 2013).

A principal desvantagem do CFD é a demanda de enorme tempo de computação (TAN; GLICKSMAN, 2005), devido ao fato de que a descrição detalhada 3D completa de um edifício com malha muito fina muitas vezes é absolutamente necessária. Consequentemente, quanto menor a malha (maior de elementos e nós), maior o tempo de computação. Contudo, nem sempre é necessário aplicar a técnica de CFD em todo o edifício, mas apenas para componentes específicos deste, com o fim de reduzir o tempo de computação (FOUCQUIER et al., 2013).

Foucquier et al. (2013) sugerem que é possível gerar propostas de otimização das condições ambientais para a armazenagem do café e, ou, para o trabalhador, em unidades de processamento úmido de café, através de simulações sobre seu comportamento em estado transitório por meio de EnergyPlusTM e complementar essa análise aplicando CFD em componentes chaves do edifício em estado estacionário, para minimizar o tempo de simulação.

Este estudo objetivou otimizar as condições ambientais em unidades de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia através de simulação computacional por meio de EnergyPlusTM e CFD.

2. MATERIAL E MÉTODOS

No desenvolvimento deste capítulo, foram levadas em consideração as três tipologias de instalação para processamento úmido de café, representativas do estado de Antioquia, Colômbia, descritas no capítulo 1. Essas tipologias arquitetônicas podem ser encontradas em toda a zona cafeeira do centro da Colômbia, já que elas são bastante similares à zona de estudo no que se refere a cultura dos cafeicultores, clima, topografia, entre outros (SÁNCHEZ, 2016; PÉREZ RENDÓN; RAMÍREZ BUILES; PEÑA QUIÑONES, 2016).

A localização das três tipologias em estudo é a seguinte:

- Tipologia 1: município de Barbosa, Antioquia, Colombia, 6°24'47.64" norte e 75°20'47.08" oeste, com 1.508 msnm.
- Tipologia 2: município de Bello, Antioquia, Colombia, 6°21'42.16" norte e 75°34'44.83" oeste, com 1.698 msnm.
- Tipologia 3: município de San Roque, Antioquia, Colombia, nas coordenadas 6°29'22.79" norte e 75°00'41.86" oeste, com 1.435 msnm.

Dentro dos critérios para a seleção das três tipologias, foram consideradas as seguintes condições similares:

- Condições geográficas e bioclimáticas de localização.
- Volume de produção de 30 toneladas de café pergaminho ao ano.
- Secagem mecânica.
- Período de produção máxima entre o mês de outubro e novembro.

Para análise das três tipologias, foram aplicadas simulações com EnergyPlus™, durante o mês de novembro, que é o mês com maior produção de café, e simulações com CFD, para uma análise mais detalhada.

2.1. Simulações a partir de EnergyPlus™

Com base no modelo de simulação aplicado em cada uma das tipologias de instalação para processamento úmido de café (capítulo 3), foram realizadas modificações nas três tipologias, em busca da sua otimização do ponto de vista da ambiência adequada para o café e para o trabalhador, avaliando temperatura do ar, umidade relativa do ar e IBUTG.

Para aplicação do modelo de simulação nas três tipologias, foram considerados os seguintes dados de entrada:

Foi elaborada uma geometria 3D no programa Sketchup®. Na Figura 1 pode-se observar a geometria dos projetos originais. A tipologia 1 tem um andar de 6,0 m x 11,0 m x 3,50 m de altura, com cobertura de laje aligeirada com tijolos, paredes de cobogós, na parte superior e tijolos furados na parte inferior, uma moega seca sobre a laje e uma chaminé sobre a zona de secagem (Figura 1-A). A tipologia 2 possui uma planta de 9,10 m x 10,05 m, paredes de tijolo furado, uma parte da cobertura de laje aligeirada com tijolos, onde a altura é de 3,60 m, e a outra parte de cobertura de fibrocimento, onde a altura é de 3,80 m. Esta construção está no meio de outras (Figura 1-B). A tipologia 3 tem 5,10 m x 14,52 m e está dividida em três desníveis, com pés-direitos de 2,40 m, 1,90 m e 2,45 m, na ordem ascendente; suas paredes são de tijolo furado revestido de azulejo e argamassa, com cobertura de alumínio na parte inferior e de laje aligeirada com tijolo no desnível superior (Figura 1-C).

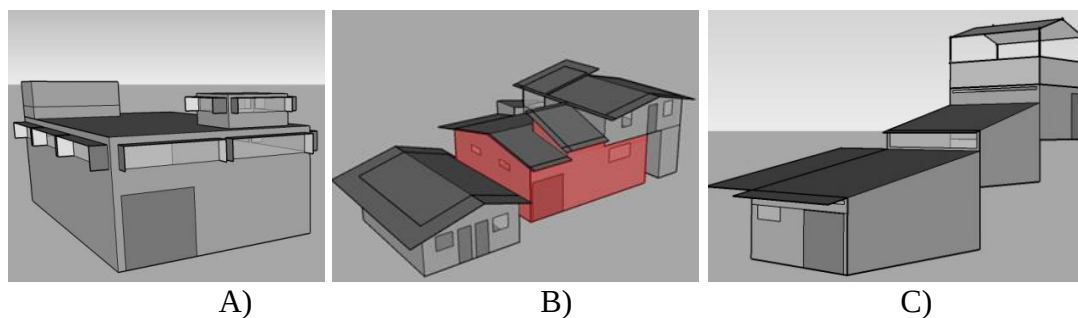


Figura 1 – Geometrias 3D dos projetos originais das três tipologias de instalação para processamento úmido de café: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

As modificações foram realizadas na área de ventilação, no material de cobertura e no material de fechamento; cada modificação constituiu um tratamento, enquanto as tipologias originais representaram as testemunhas. No entanto, as modificações deram lugar a dois grupos de projetos arquitetônicos: no grupo de projetos 1 (GP1) foi considerada cada tipologia com sua distribuição arquitetônica original como uma única zona térmica, com as modificações mencionadas; no grupo de projetos 2 (GP2) foi realizada uma divisão na planta arquitetônica original, criando de forma independente uma zona úmida, uma zona seca e uma zona para armazenagem do café, construindo três zonas térmicas, além das modificações supracitadas. Nas Tabelas 1 e 2 podem-se observar os dois grupos de projetos criados e os tratamentos aplicados, os quais constituem as modificações realizadas.

Tabela 1 – Tratamentos aplicados no Grupo de Projetos 1 (GP1), gerado das tipologias de instalação para processamento úmido de café

1	TESTEMUNHA	Tipologia 1: Zona térmica única	Tipologia 2: Zona térmica única	Tipologia 3: Zona térmica única
2	AREA DE VENTILAÇÃO	*67.73 m ² (original = 23,32m ²)	*26.96 m ² (original = 9,14m ²)	*20.38 m ² (original = 8,52m ²)
3	MATERIAL DE COBERTURA	Cobertura de alumínio com superfície superior branca	Cobertura de alumínio com superfície superior branca	Cobertura de alumínio com superfície superior branca
4		Forro PVC 9mm	Forro PVC 9mm	Forro PVC 9mm
5	MATERIAL DE FECHAMENTO	Tijolo maciço	Tijolo maciço	Tijolo maciço

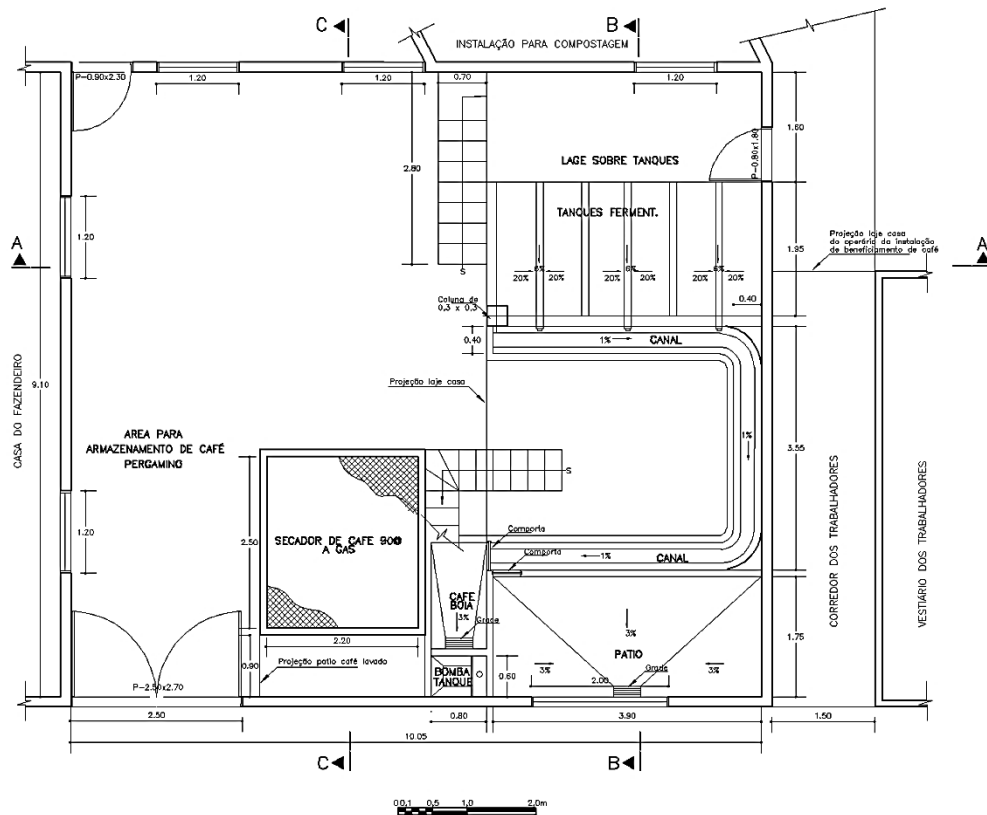
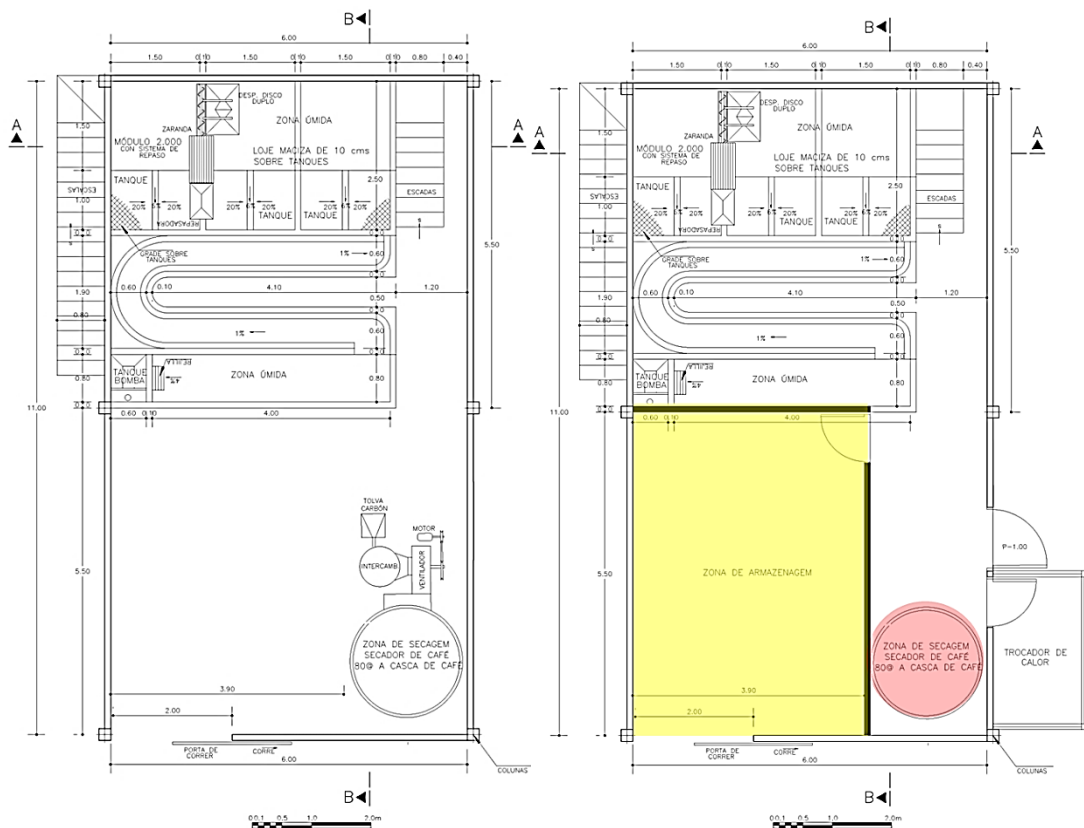
* Área de abertura máxima possível para cada tipologia.

Tabela 2 – Tratamentos aplicados no Grupo de Projetos 2 (GP2), gerado das tipologias de instalação para processamento úmido de café

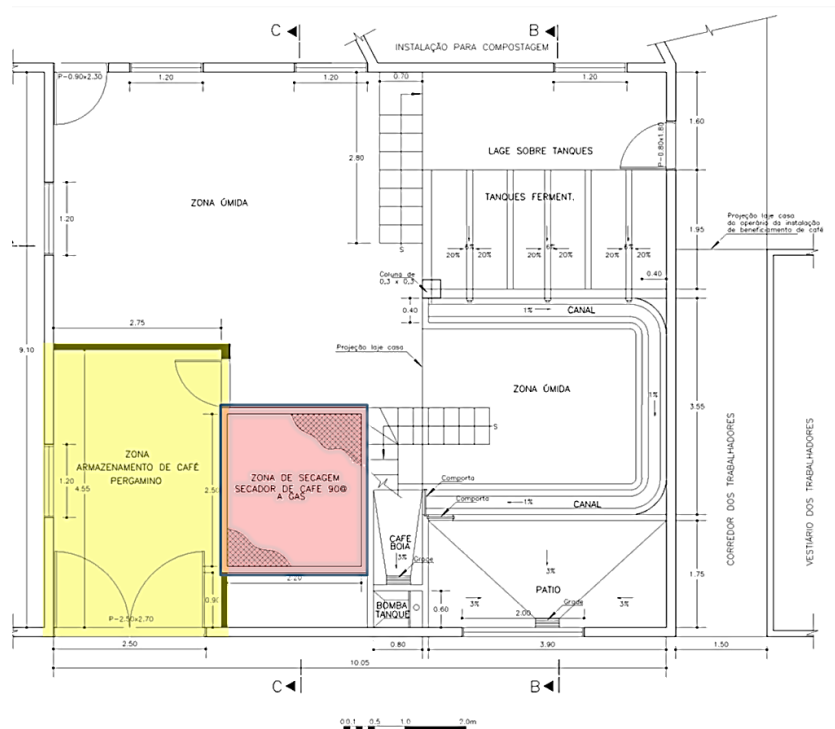
TRATAMENTO		DESCRIÇÃO		
		Tipologia 1	Tipologia 2	Tipologia 3
1	TESTEMUNHA	Tipologia 1: Zona térmica única	Tipologia 2: Zona térmica única	Tipologia 3: Zona térmica única
2	3 ZONAS TÉRMICAS (3ZT)	3 zonas térmicas com trocador de calor fora da instalação	3 Zonas térmicas*	3 Zonas térmicas com trocador de calor fora da instalação
3	3ZT AREA DE VENTILAÇÃO	Janela adicional na zona de armazenamento (1.76m ²) com trocador de calor fora da instalação	Janela adicional na zona de armazenamento	Claraboia adicional na zona de armazenamento com trocador de calor fora da instalação
4	3ZT MATERIAL DE COBERTURA	Forro PVC 9mm com trocador de calor fora da instalação	Forro PVC 9mm	Forro PVC 9mm com trocador de calor fora da instalação
5	3ZT MATERIAL DE FECHAMENTO	Tijolo maciço com trocador de calor fora da instalação	Tijolo maciço	Tijolo maciço com trocador de calor fora da instalação

* O trocador de calor foi mantido adentro porque funciona com gás, e não gera calor de forma considerável.

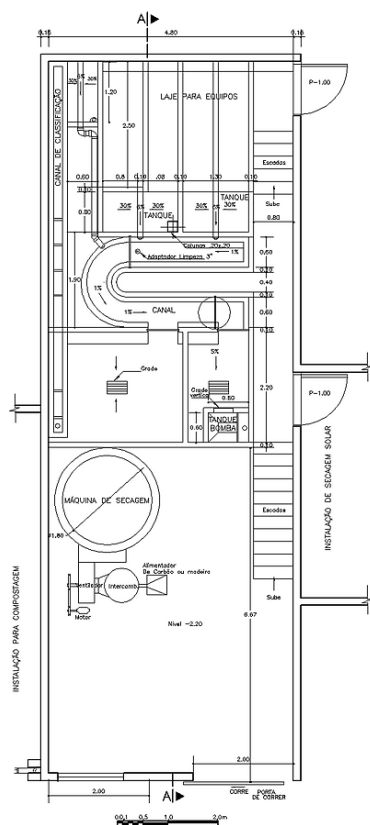
Na Figura 2 é possível observar a distribuição arquitetônica original de cada tipologia, bem como a divisão arquitetônica realizada para criar as três zonas, respectivamente.



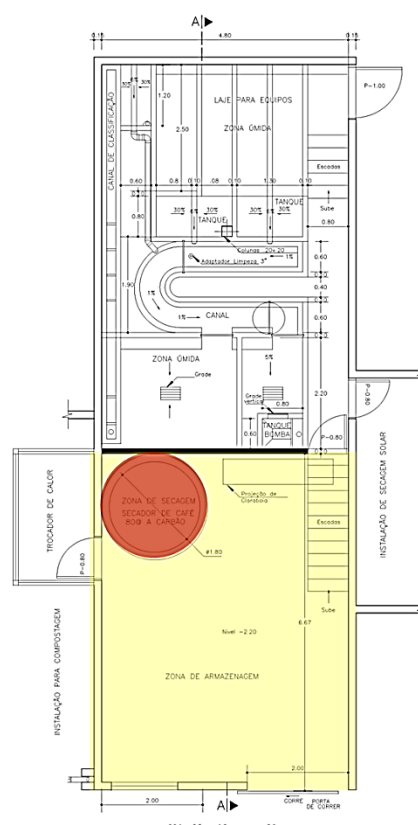
B



B'



C



C'

Figura 2 – Distribuição arquitetônica original: A, B e C, das tipologias 1, 2 e 3 respectivamente; e divisão arquitetônica para criar três zonas independentes: A', B', e C' das tipologias 1, 2 e 3 respectivamente (zona de armazenagem em amarelo, zona de secagem em vermelho e zona úmida sem cor).

Foi utilizado o arquivo climático de Medellín, por fornecer dados meteorológicos completos num local próximo a todas as tipologias de instalação para processamento úmido de café em estudo.

Para criar as zonas térmicas foi utilizado o plug-in Open Studio do EnergyPlus™ que gerou arquivos idf para cada tipologia e modificação. Estas zonas têm um grupo de objetos (Zona, BuildingSurface) que descrevem as características térmicas da zona, assim como os detalhes de cada superfície modelada (UNITED STATES, 2014).

Foi utilizado o método de simplificação de camadas de materiais (BRASIL, 2013), e cálculo da espessura e resistência térmica equivalente (LABEEE, 2014), para calcular as propriedades térmicas dos materiais compostos das construções. As propriedades térmicas de alguns materiais de construção utilizados nas três tipologias são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades térmicas de materiais

Material	$\rho(\text{kg.m}^3)$	$\lambda(\text{W.m}^{-1}.\text{°K}^{-1})$	$C_p(\text{kJ.kg}^{-1}.\text{°K}^{-1})$
Argamassa	2000	1.15	1.00
Concreto	2200	1.75	1.00
Tijolo	2200	0.95	0.84
Fibrocimento	1600	0.65	0.84
Cerâmica	1600	0.90	0.92
PVC	1200	0.20	1.00
Aço-Ferro	7800	55	0.46
Alumínio	2700	230	0.88

Fonte: NBR-15220 (ABNT, 2005).

As aberturas constituídas por cobogós na tipologia 1 foram simplificadas colocando-as em forma de janelas com a área efetiva dos cobogós, adicionando proteções solares para simular a interferência da luz.

Os tanques de fermentação, classificador hidráulico e escadas constituem uma massa de material em cada tipologia, que foi quantificada e adicionada à parede imediata, com o fim de considerar o efeito da sua inércia térmica.

O calor gerado pelos equipamentos de processamento de café e pela iluminação dentro das instalações é apresentado na Tabela 4, enquanto o calor metabólico dos trabalhadores considerado foi de 440 Kcal/h (512 W), o qual corresponde a um trabalho

intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos (NR 15, 2011), sendo comum no processamento de café nas três tipologias.

Tabela 4 – Potência dos equipamentos no processamento do café nas tipologias de processamento úmido de café em estudo

Equipamento	Potência (W)
Despolpadora	3357
Motor secadora	2238
Motobomba*	456
Luminárias	600

* Unicamente presente na Tipologia 3.

Na tipologia 1, o combustível do trocador de calor é de casca de café e consome 0,352 kg desse material por kg de café pergaminho seco, com poder calorífico de 17.936 kJ.kg-1. Na tipologia 2, o combustível usado é gás, sendo consumido 0,058 kg do combustível por kg de café pergaminho seco, com poder calorífico de 47.488,4 kJ.kg-1. Na tipologia 3, o trocador de calor funciona com lenha e carvão, mas, para facilitar os cálculos, foi considerado o carvão, com consumo de 0,224 kg desse material por kg de café pergaminho seco e poder calorífico de 33.440 kJ.kg-1.

Na Tabela 5 podem ser observados os padrões de uso inseridos no EnergyPlus™ para as simulações.

Tabela 5 – Padrões de uso nas simulações das três tipologias de instalação para processamento úmido de café, no GP1 e GP2

Horário	Operário do processamento úmido do café	Secagem mecânica de café	Despolpamento de café	Lavagem de café	Classificação hidráulica de café	Embalagem	Luminárias
00:00-07:00	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off
07:00-07:15	On	On	Off	Off	Off	Off	Off
07:15-08:00	On	On	On	Off	Off	Off	Off
08:00-09:00	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off
09:00-10:00	On	On	On	Off	Off	Off	Off
10:00-12:00	On	On	Off	On	Off	Off	Off
12:00-12:45	On	Off	Off	Off	Off	Off	Off
12:45-13:00	On	On	Off	Off	Off	Off	Off
13:00-14:00	Off	On	Off	Off	Off	Off	Off
14:00-14:15	On	On	Off	Off	Off	Off	Off
14:15-17:00	On	On	Off	Off	On	Off	Off
17:00-17:45	On	Off	Off	Off	Off	Off	On
17:45-19:00	On	Off	Off	Off	Off	On	On
19:00-24:00	Off	Off	Off	Off	Off	Off	Off

Para se proceder à análise de temperatura e umidade relativa do ar, assim como do IBUTG, foram considerados dados de saída da seguinte forma: foram extraídos 720 dados correspondentes a cada hora do mês de novembro, de temperatura e umidade relativa do ar, das simulações com cada tratamento descrito. Os resultados de temperatura foram confrontados com os valores recomendados por Puerta Quintero (2003), de 20°C e entre 65% e 70%, respectivamente, para conservar a qualidade do café pergaminho seco armazenado.

Para obter o IBUTG, foi necessário calculá-lo através da Equação 1, adequada para avaliação de ambientes internos (sem carga solar) (NR 15, 2011), em razão de o EnergyPlus™ não fornecer esse índice dentro dos seus dados de saída.

$$IBUTG = 0,7 \, tbn + 0,3 \, tg \quad [Eq. 1]$$

em que tbn = temperatura de bulbo úmido natural, °C; e tg = temperatura de globo negro, °C.

Também foi necessário calcular a Temperatura de Globo Negro (tg) e a Temperatura de Bulbo Úmido (tbn), a partir das Equações 2 e 3.

A partir da Equação 2 de Temperatura Média Radiante (FANGER, 1972), foi obtida a tg , aproveitando os dados de TRM e T_{bs} que são fornecidos pelo EnergyPlus™ como dados de saída, sendo 720 dados de cada. Além disso foi calculada a velocidade do ar dentro das instalações (Equação 2), partindo dos dados do volume de infiltração (m³/h) de cada zona térmica (cada instalação com cada tratamento), sendo o volume de infiltração outro dado de saída fornecido pelo software, do qual saíram também 720 dados.

Para obter a Temperatura de Bulbo Úmido através da Equação 3 (STULL, 2011), foram aproveitados os dados de T_{bs} e de umidade relativa do ar (720 dados) que são proporcionados pelo EnergyPlus™, como dados de saída.

$$TRM = T_g + 1.9\sqrt{V_a} (T_g + T_{bs}) \quad [Eq. 2]$$

em que T_g = temperatura de globo, °C; T_{bs} = temperatura de bulbo seco, °C; e V_a = velocidade do ar, m/s.

$$T_{bn} = T_{atan} \left[0,151977(UR\% + 8,313659)^{\frac{1}{2}} \right] + \operatorname{atan}(T_{bs} + UR\%) - \operatorname{atan}(UR\% - 1,676331) + 0,00391838(UR\%)^{\frac{3}{2}} \operatorname{atan}(0,023101UR\%) - 4,686035$$

[Eq. 3]

em que T_{bn} é a temperatura de bulbo úmido, °C; e $UR\%$, Umidade relativa do ar, °C.

A fim de estabelecer os limites de tolerância dos trabalhadores para a exposição ao calor em IBUTG (°C), foi considerada a taxa metabólica de 440 Kcal/h (512W), para um trabalho intermitente de levantar, empurrar ou arrastar pesos, que é o mais repetitivo nas tipologias em estudo e catalogado como pesado, de acordo com as taxas metabólicas definidas por atividade na NR15 (2011). Assim também foi levado em consideração que o limite para o IBUTG de uma atividade pesada, desenvolvida de forma contínua em uma hora, é de 25°C (NR 15, 2011).

Para comparar o comportamento da temperatura do ar, da umidade relativa do ar e do IBUTG das testemunhas com as tipologias com tratamentos em EnergyPlus™, foi elaborada análise de variância com delineamento inteiramente casualizado a 1% de probabilidade, acompanhada de análise de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade, cujos tratamentos foram mostrados nas Tabelas 1 e 2.

Os resultados de IBUTG foram confrontados com o limite do IBUTG de 25°C.

2.2. Simulações a partir de CFD

Segundo as condições de temperatura do ar, umidade relativa do ar e IBUTG encontradas com as simulações baseadas em EnergyPlus™, foram selecionadas as condições ambientais da zona de armazenagem no GP2, principalmente no tratamento 2, no qual houve melhoria considerável na umidade relativa do ar, segundo a faixa recomendada para conservar a qualidade do café, para analisar com mais detalhes o comportamento tanto da umidade relativa do ar quanto da temperatura através do CFD.

Para o modelo e simulação computacional foram realizadas três geometrias sólidas em 3D, a escala real, da zona de armazenagem de cada tipologia de instalação para processamento úmido de café no programa Rhinoceros, conforme a Figura 3, geometrias a partir das quais, com ajuda do programa computacional ANSYS ICEM CFD 13, foram construídas as malhas computacionais tetraédricas (Figura 4).

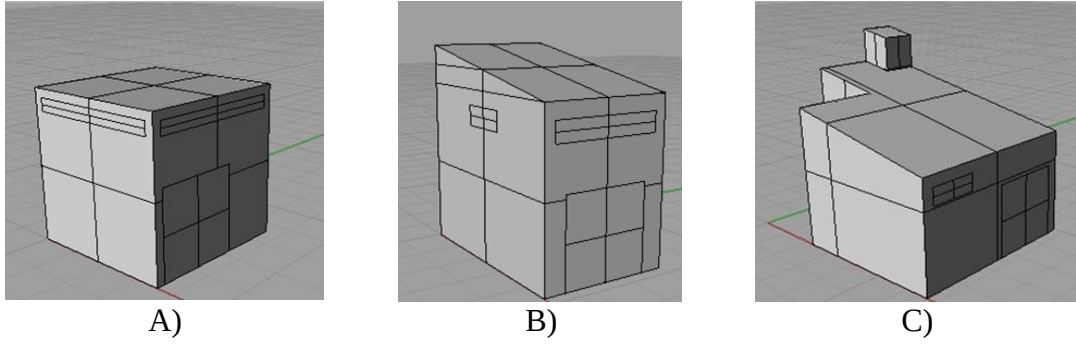


Figura 3 – Geometrias 3D das zonas de armazenagem de café nas tipologias de instalação para processamento úmido de café, do GP2: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

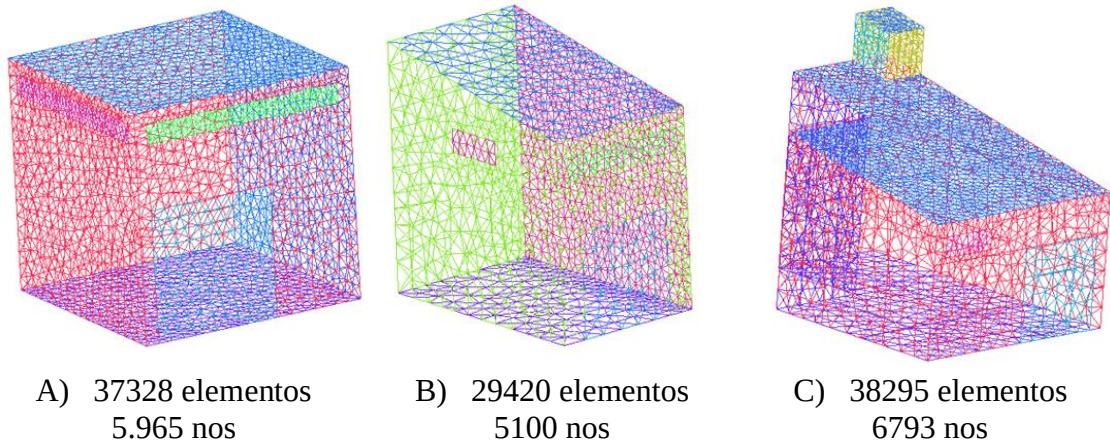


Figura 4 – Malhas computacionais tetraédricas das zonas de armazenagem de café nas tipologias de instalação para processamento úmido de café, do GP2: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

Avanços recentes em programas computacionais baseados em CFD facilitam o estudo dos campos escalares e vetoriais presentes no microclima de instalações, por meio da solução das equações que descrevem o fluxo de fluidos, comumente conhecidas como Equações Simplificadas de Navier-Stokes (TU; YEOH; LIU, 2007; KIM et al., 2008; VAZ et al., 2011; ROCHA et al., 2013):

$$\nabla \cdot (\rho U) = 0 \quad (1)$$

$$\nabla \cdot (\rho U U) = \nabla p + [\mu_\tau (\nabla U + \nabla U^T)] \quad (2)$$

$$\nabla \cdot (-k \nabla T + \rho C_p T U) = 0 \quad (3)$$

em que C_p : Calor específico ($\text{J kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$); k : Condutividade térmica ($\text{W m}^{-1} \text{ }^\circ\text{K}^{-1}$); p : Pressão (N m^{-2}); U : Vector velocidade (m s^{-1}); ρ : Densidade (kg m^{-3}); μ : Viscosidade dinâmica ($\text{kg m}^{-1}\text{s}^{-1}$); e T : Temperatura ($^\circ\text{K}$).

O movimento turbulento foi modelado por meio do modelo k- ϵ padrão, que avalia a viscosidade (μ_t) a partir de uma relação entre a energia cinética turbulenta (k) e a dissipação da energia cinética turbulenta (ϵ). A simulação computacional foi realizada em estado estacionário; as condições de contorno foram estabelecidas a partir dos dados climáticos médios para o mês de novembro e com as propriedades térmicas dos materiais de construção de cada instalação. O critério de convergência foi o valor do erro quadrático médio (RMS) da solução inferior a 10^{-4} para as equações de conservação de momento, energia e continuidade.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Simulações a partir de EnergyPlus™

3.1.1. Grupo de projetos 1 (GP1)

Tipologia 1

De acordo com o teste de médias da Tabela 6, na comparação da temperatura do ar da tipologia 1 segundo os tratamentos aplicados (GP1), observou-se diferença significativa entre a média do tratamento 2 (modificação da área de ventilação) e as médias dos demais tratamentos. Contudo, nenhuma das médias mostrou temperatura média abaixo de 20°C , como recomenda Puerta Quintero (2003).

Tabela 6 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 1, segundo os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	22.83 a	3,74
2	720	22.25 b	3,22
3	720	22.82 a	3,89
4	720	23.09 a	3,39
5	720	22.87 a	3,30

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 5,645$).

Na Tabela 7 é apresentado o teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 1, de acordo com os tratamentos aplicados (GP1), onde não se observou diferença significativa entre as médias dos tratamentos. Entretanto, o tratamento 4 (forro) poderia ser a melhor opção por apresentar uma média que não está tão perto do limite superior da faixa recomendada (entre 65% e 70%).

Tabela 7 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 1, de acordo com os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	70.157 a	14,964
2	720	69.738 a	14,661
3	720	70.228 a	15,212
4	720	68.784 a	13,482
5	720	69.852 a	13,986

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 1,149$).

Na Tabela 8 encontra-se o teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 1, conforme os tratamentos aplicados (GP1). Foi observada diferença significativa entre a média do IBUTG resultante do tratamento 2 (modificação da área de ventilação) e as demais médias. No entanto, todas as médias estiveram abaixo do limite do IBUTG de 25°C para trabalhos pesados.

Tabela 8 – Teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 1, conforme os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	20.54 a	3,09
2	720	19.82 b	2,26
3	720	20.50 a	3,29
4	720	20.84 a	2,66
5	720	20.59 a	2,50

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 13,4$).

Tipologia 2

Na Tabela 9 é apresentado o teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 2 segundo os tratamentos aplicados (GP1). Não foi encontrada diferença significativa nas médias da temperatura dos tratamentos desta tipologia. Contudo, todas as médias estiveram acima do limite recomendado: 20°C.

Tabela 9 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 2, segundo os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	22.507 a	3,368
2	720	22.196 a	3,143
3	720	22.429 a	3,201
4	720	22.504 a	3,379
5	720	22.587 a	3,172

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 1,52$).

Segundo o teste de médias da Tabela 10, na comparação da umidade relativa do ar da tipologia 2, conforme os tratamentos aplicados (GP1), não houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos. Nenhuma das médias esteve dentro da faixa recomendada.

Tabela 10 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 2, conforme os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	72.018 a	13,973
2	720	70.71 a	14,444
3	720	72.309 a	13,621
4	720	71.548 a	13,297
5	720	71.548 a	13,297

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 1,405$).

De acordo com o teste de médias da Tabela 11, na comparação do IBUTG da tipologia 2, segundo os tratamentos aplicados (GP1), houver diferença significativa no IBUTG desta tipologia, entre a média do tratamento 2 (modificação da área de ventilação) e as demais médias. Não obstante todos os tratamentos apresentaram médias de IBUTG abaixo do limite de 25°C para trabalhos pesados.

Tabela 11 – Teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 2, de acordo com os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	19.91 a	2,323
2	720	19.51 b	1,931
3	720	19.79 a	2,124
4	720	19.88 a	2,322
5	720	19.96 a	2,115

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey, a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 4,871$).

Tipologia 3

Na Tabela 12 é apresentado o teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 3, segundo os tratamentos aplicados (GP1). Houve diferença significativa entre a média do tratamento 2 (modificação da área de ventilação) e as médias dos demais tratamentos, porém todas as médias estiveram acima do limite recomendado (20°C).

Tabela 12 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 3, segundo os tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	23.37 a	4,11
2	720	22.64 b	3,48
3	720	23.26 a	4,02
4	720	23.49 a	4,12
5	720	23.50 a	3,73

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 5,976$).

Segundo o teste de médias da Tabela 13, na comparação da umidade relativa do ar da tipologia 2 partindo dos tratamentos aplicados (GP1), não foi encontrada diferença significativa entre as médias dos tratamentos. Entretanto, a maioria das médias esteve dentro da faixa recomendada, mas bastante próximas do limite superior desta.

Tabela 13 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 3, partindo dos tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	69.962 a	14,218
2	720	69.895 a	14,297
3	720	70.416 a	14,044
4	720	69.424 a	14,035
5	720	69.344 a	13,327

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 0,702$).

De acordo com o teste de médias da Tabela 14, na comparação do IBUTG da tipologia 2 a partir dos tratamentos aplicados (GP1), houve diferença significativa entre a média do tratamento 2 (modificação da área de ventilação) e as médias dos demais tratamentos. Contudo, todas as médias foram inferiores ao limite de IBUTG de 25°C para trabalhos pesados.

Tabela 14 – Teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 3, a partir dos tratamentos aplicados – GP1

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	21.15 a	3,630
2	720	20.36 b	2,736
3	720	21.02 a	3,528
4	720	21.29 a	3,689
5	720	21.28 a	3,222

Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 9,351$).

No GP1, a média da temperatura nas três tipologias sempre esteve acima do limite recomendado de 20°C, sendo apenas o tratamento 2 (aumento na ventilação natural) aquele que mostrou diminuição na temperatura interna das tipologias 1 e 3, porém não foi suficiente. No comportamento da umidade relativa do ar, as médias das três tipologias foram estatisticamente iguais em todos os tratamentos, destacando-se que houve médias dentro da faixa recomendada na tipologia 1 e na tipologia 3, mas bastante perto do limite superior, exceto no tratamento 4 (forro) da tipologia 1, cujo valor foi mais adequado. O restante das médias esteve acima da faixa. Notou-se alta variabilidade nos dados de umidade relativa do ar nas três tipologias, influenciada por seu comportamento no ambiente externo e pela umidade produzida no processo de secagem, a qual não consegue ser controlada com as modificações feitas nos tratamentos. Com relação ao IBUTG, apesar de ter havido diferença estatística entre as médias por causa do tratamento 2 (aumento na área de ventilação) nas tipologias 1 e 3, todas as tipologias apresentaram IBUTG dentro do limite de 25°C para trabalhos pesados, em todos os tratamentos.

3.1.2. Grupo de projetos 2 (GP2)

Tipologia 1

Segundo o teste de médias da Tabela 115, na comparação da temperatura do ar da tipologia 1, segundo os tratamentos aplicados (GP2), houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos da zona úmida e as médias dos tratamentos da zona de armazenagem, bem como entre as médias dos tratamentos da zona úmida e a testemunha. Não houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos de uma mesma zona. No entanto, todas as médias estiveram acima do limite de 20°C para a conservação da qualidade do café.

Na Tabela 16 é apresentado o teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 1, conforme os tratamentos aplicados (GP2), onde se observa que houve diferença significativa entre as médias de todos os tratamentos e a testemunha. Além disso, verificou-se diferença estatística entre as médias dos tratamentos da zona úmida e as dos tratamentos da zona de armazenagem, não havendo diferença entre tratamentos de uma mesma zona. As médias de todos os tratamentos, principalmente na zona de armazenagem, estiveram dentro da faixa recomendada para conservar a qualidade do café.

Tabela 15 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 1, segundo os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	22.83 a	3,744
2	720	22.28 b	2,671
2'	720	22.74 a	2,437
3	720	22.26 b	2,713
3'	720	22.73 a	2,439
4	720	22.28 b	2,671
4'	720	22.74 a	2,437
5	720	22.4 b	2,875
5'	720	22.90 a	2,833

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 6,376$).

Tabela 16 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 1, conforme os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	70.16 a	14,964
2	720	67.38 b	13,062
2'	720	65.53 c	11,765
3	720	67.52 b	13,235
3'	720	65.54 c	11,776
4	720	67.38 b	13,062
4'	720	65.53 c	11,765
5	720	67.09 b	13,724
5'	720	65.19 c	13,072

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 10.666$).

Na Tabela 17 encontra-se o teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 1, a partir dos tratamentos aplicados (GP2). Foi observada diferença significativa entre as médias dos tratamentos da zona úmida e da zona de armazenagem com a testemunha; embora tenha havido diferença estatística em alguns tratamentos entre

estas duas zonas, todas as médias estiveram abaixo do limite do IBUTG de 25°C para trabalhos pesados.

Tabela 17 – Teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 1, a partir dos tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	20.54 c	3,089
2	720	19.63 a	1,112
2'	720	19.80 ab	1,057
3	720	19.64 a	1,157
3'	720	19.80 ab	1,059
4	720	19.63 a	1,112
4'	720	19.80 ab	1,057
5	720	19.86 ab	1,441
5'	720	20.01 b	1,443

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 25,114$).

Tipologia 2

Na Tabela 18 é apresentado o teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 2 de acordo com os tratamentos aplicados (GP2). Foi encontrada diferença estatística entre a média do tratamento 5 (tijolo maciço) da zona de armazenagem e as médias dos demais tratamentos das duas zonas em estudo, e com a testemunha, exceto nos tratamentos 2 (janela adicional) e 4 (forro) da zona de armazenagem. Contudo, todas as médias estiveram acima do limite recomendado de 20°C para conservar a qualidade do café.

Segundo o teste de médias da Tabela 19, na comparação da umidade relativa do ar da tipologia 2, segundo os tratamentos aplicados (GP2), as médias dos tratamentos 1 (testemunha), 4 (forro) e 5 (tijolo maciço), estes últimos na zona de armazenagem, foram estatisticamente diferentes daquelas dos demais, estando acima da faixa recomendada; nos demais tratamentos, principalmente na zona de armazenagem, todas as médias estiveram dentro da faixa recomendada para conservar a qualidade do café.

Tabela 18 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 2, de acordo com os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	22.51 a	3,37
2	720	22.85 ab	2,35
2'	720	22.60 a	3,02
3	720	22.42 a	2,57
3'	720	22.59 a	3,02
4	720	22.84 ab	2,04
4'	720	22.53 a	2,86
5	720	23.20 b	2,22
5'	720	22.70 a	2,75

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 5,574$).

Tabela 19 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 2, segundo os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	72.02 a	13,97
2	720	65.89 b	11,42
2'	720	66.58 b	13,94
3	720	66.84 b	12,64
3'	720	66.6 b	13,95
4	720	72.87 a	9,35
4'	720	66.8 b	13,45
5	720	70.93 a	8,94
5'	720	65.99 b	12,85

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 36,738$).

De acordo com o teste de médias da Tabela 20, na comparação do IBUTG da tipologia 2, partindo dos tratamentos aplicados (GP2), foi encontrada diferença significativa entre as médias dos tratamentos de cada zona em estudo e entre elas e a testemunha. Não obstante, todas as médias estiveram abaixo do limite de IBUTG de 25°C para trabalhos pesados.

Tabela 20 – Teste de médias do comportamento do IBUTG da tipologia 2, partindo dos tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	20.54 a	3,09
2	720	19.63 b	1,11
2'	720	19.80 c	1,06
3	720	19.64 b	1,16
3'	720	19.80 c	1,06
4	720	19.63 b	1,11
4'	720	19.80 c	1,06
5	720	19.86 c	1,44
5'	720	20.01 c	1,44

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 25,114$).

Tipologia 3

Na Tabela 21 é apresentado o teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 3, conforme os tratamentos aplicados (GP2). Foi encontrada diferença estatística apenas entre a média da testemunha e as médias dos demais tratamentos; todas as médias superaram o limite recomendado de 20°C para conservar a qualidade do café.

Tabela 21 – Teste de médias do comportamento da temperatura do ar da tipologia 3, conforme os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	23.37 a	4,11
2	720	22.71 b	3,26
2'	720	22.47 b	3,08
3	720	22.71 b	3,26
3'	720	22.46 b	3,08
4	720	22.67 b	3,10
4'	720	22.40 b	2,93
5	720	22.89 b	2,69
5'	720	22.62 b	2,79

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 6,983$).

Segundo o teste de médias da Tabela 22, na comparação da umidade relativa do ar da tipologia 3, de acordo com os tratamentos aplicados (GP2), houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos e as da testemunha, mas não houve diferença estatística entre as médias dos tratamentos da zona úmida e as da zona de armazenagem, com exceção da média do tratamento 5 (tijolo maciço) na zona de armazenagem, a qual foi a única que esteve fora da faixa recomendada.

Tabela 22 – Teste de médias do comportamento da umidade relativa do ar da tipologia 3, de acordo com os tratamentos aplicados – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	69.96 a	14,22
2	720	66.21 b	14,78
2'	720	67.28 b	14,26
3	720	66.21 b	14,78
3'	720	67.31 b	14,26
4	720	66.21 b	14,26
4'	720	67.45 b	13,78
5	720	64.96 c	12,67
5'	720	66.41 b	13,07

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 7,064$).

Segundo o teste de médias da Tabela 23, houve diferença significativa entre as médias dos tratamentos no IBUTG da tipologia 3, porém nenhuma das médias do IBUTG superou o limite de 25°C para trabalhos pesados.

No GP2, embora tenha havido diferença nas médias de temperatura dos tratamentos nas três tipologias, seja entre as zonas térmicas ou entre elas e a testemunha, todas as médias superaram o limite recomendado de 20°C, principalmente para conservar o café nas zonas de armazenagem. Com relação à umidade relativa do ar, a mudança das tipologias de instalação para processamento úmido de café, de uma zona única para três zonas independentes, colocando o trocador de calor fora da instalação, especificamente nas tipologias 1 e 3, melhorou bastante o comportamento dessa variável nas três tipologias. Isso fez com que fosse possível que, apenas com o tratamento 2 (criação de três zonas térmicas), a média da umidade relativa do ar estivesse dentro da faixa recomendada para conservar a qualidade do café na zona de armazenagem, embora tenha

sido assim também na zona úmida. Não obstante, isso acontece quando se aplicam os demais tratamentos, mas para esses resultados foi determinante a divisão prévia da planta arquitetônica nas três tipologias. Neste grupo de projetos, a alta variabilidade nos dados de umidade relativa do ar nas três tipologias persiste. No caso do IBUTG, as médias dos tratamentos das três tipologias sempre se mantiveram dentro do limite de 25°C para trabalhos pesados, embora tenham sido encontradas diferenças estatísticas, principalmente entre as zonas estudadas e a testemunha.

Tabela 23 – Teste de médias do comportamento do IBUTG dos projetos da tipologia 3 – GP2

Tratamento	N	Média	Desvio-Padrão
1	720	21.15 a	3,63
2	720	19.91 bc	1,93
2'	720	19.56 b	1,69
3	720	19.91 bc	1,93
3'	720	19.55 b	1,68
4	720	19.86 bc	1,76
4'	720	19.47 b	1,53
5	720	20.08 c	1,30
5'	720	19.67 b	1,37

Tratamentos com apóstrofo correspondem à zona úmida. Tratamentos sem apóstrofo correspondem à zona de armazenagem. Médias seguidas da mesma letra não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey a 0,05 de probabilidade ($P < 0,001$, $F = 47,682$).

3.2. Simulações a partir de CFD

Na Figura 5 pode-se observar que, em média, o melhor comportamento de temperatura, menor ou igual a 20°C, conforme a recomendada por Puerta Quintero (2003), apresenta-se nas zonas de armazenagem das tipologias 1 e 3, mostrando também a influência das aberturas e do piso na diminuição de temperatura, ao passo que houve aumento na superfície da parede que é compartilhada com a zona de secagem na tipologia 1. No entanto, segundo esse autor, no armazenagem de café os sacos devem estar separados das paredes, do piso e das aberturas com possíveis entradas de sol, o que faz com que a zona que permanece dentro da temperatura recomendada finalmente seja ótima para o café nessas duas tipologias.

Na Figura 5 encontra-se o comportamento da umidade relativa do ar, onde se nota que a tipologia que atingiu melhor a faixa de umidade relativa, recomendada por

Puerta Quintero (2003) para armazenamento de café em pergaminho (65% – 70%), foi a tipologia 1, seguida da tipologia 3. Esta última apresenta ambiente mais homogêneo, mas com ar um pouco mais seco do que o recomendado, possivelmente pelo efeito da chaminé do ar que entra pela fachada principal e sai pela abertura proposta na cobertura, além da temperatura da superfície da parede que é compartilhada com a zona de secagem. Nesse caso, recomenda-se adicionar um material isolante nessa parede.

No caso da tipologia 2, embora o ambiente na zona de armazenamento tenha melhorado para conservar a qualidade do café, também se pode recomendar um material isolante na parede que é compartilhada com a zona de secagem, já que parece estar influenciando no aumento da temperatura ao redor dela, deixando a umidade relativa do ar abaixo da faixa recomendada.

4. CONCLUSÕES

A simulação computacional por meio do EnergyPlus™ e do CFD permitiu otimizar as condições ambientais das unidades de processamento úmido de café em estudo.

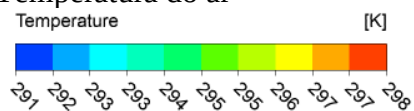
Na análise da umidade relativa do ar, por meio das simulações com EnergyPlus™ das três tipologias de instalação para processamento úmido de café com os tratamentos propostos, foi possível encontrar projetos em que a média da umidade relativa do ar estivesse dentro da faixa recomendada para conservar a qualidade do café na zona de armazenagem.

Na análise da temperatura do ar, as simulações aplicadas nas três tipologias com EnergyPlus™ mostraram resultados que superam o limite recomendado na maioria dos tratamentos, sobretudo na zona de armazenamento. Contudo, as simulações por meio do CFD permitiram analisar com detalhes que, apesar dos resultados com EnergyPlus™, dentro da zona de armazenamento a distribuição espacial da temperatura possibilita armazenar o café em condições adequadas para as tipologias 1 e 3.

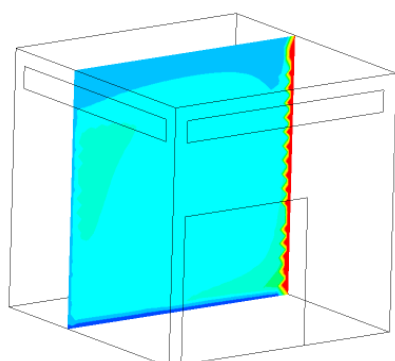
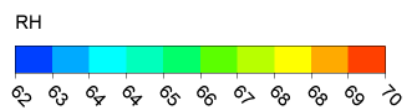
Na análise do IBUTG, as três tipologias de instalação para processamento úmido de café apresentaram bom comportamento nos dois grupos de projetos analisados.

A tipologia 1 apresentou o melhor comportamento tanto de temperatura e umidade relativa do ar para manter a qualidade do café na zona de armazenagem, quanto do IBUTG para o trabalhador na zona úmida, nas análises com EnergyPlus™ e com CFD.

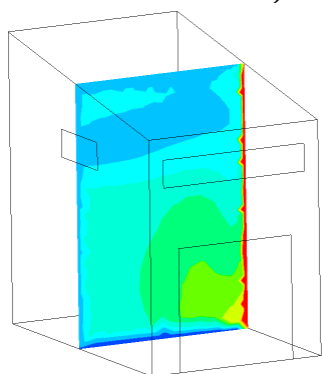
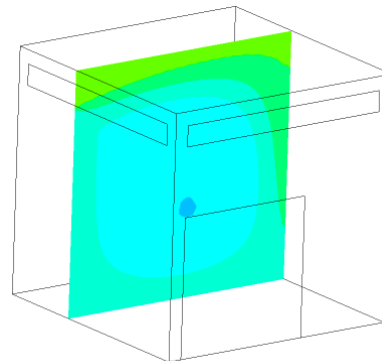
Temperatura do ar



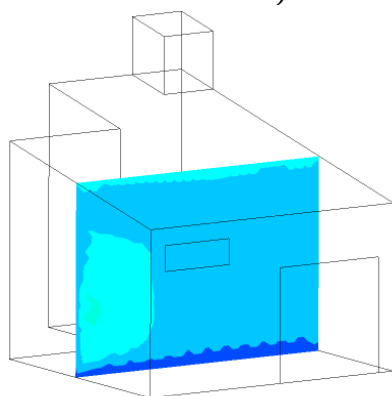
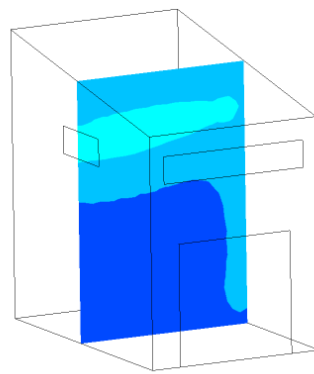
Umidade Relativa do ar



A)



B)



C)

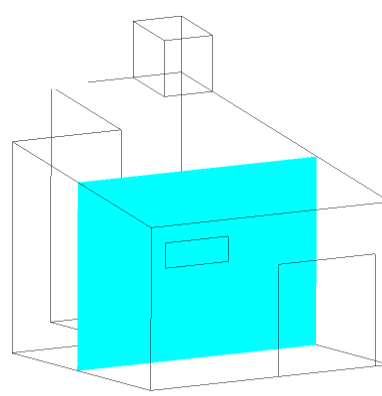


Figura 5 – Perfis de temperatura e umidade relativa do ar para as zonas de armazenagem de café nas tipologias de instalação para processamento úmido de café – GP2: A) tipologia 1, B) tipologia 2 e C) tipologia 3.

A divisão e separação espacial das tipologias de instalação para processamento úmido de café estudadas, em que a zona úmida, a zona seca e a zona de armazenagem ficaram independentes, colocando o trocador de calor fora da instalação, foram determinantes para manter as condições ambientais do café e do trabalhador dentro dos limites recomendados. Essa pode ser uma proposta de modificações viável para melhorar o ambiente para o trabalhador e para o café, nessas instalações que são representativas das tipologias arquitetônicas de unidades de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia.

5. REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR15220-2, de abril de 2005**. Desempenho térmico de edificações - parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **NBR15220-2, de abril de 2005**. Desempenho térmico de edificações - parte 2: Métodos de cálculo da transmitância térmica, da capacidade térmica, do atraso térmico e do fator de calor solar de elementos e componentes de edificações. Rio de Janeiro, RJ, 2005.

BITENCOURT, D.P.; RUAS, A.C.; MAIA, P.A. Análise da contribuição das variáveis meteorológicas no estresse térmico associada à morte de cortadores de cana-de-açúcar. **Cad. Saúde Pública**, v. 28, n. 1, p. 65-74, 2012.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior. Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. **Anexo V - Portaria n. 50, de 01 de fevereiro de 2013**. Brasília, DF, 2013.

BRE, F.; FACHINOTTI, V.D.; BEARZOT, G. Mecânica computacional. **Heat and Mass Transfer (A)**, v. 32, n. 37, 2013.

COLOMBIA. Ministério de Trabajo y Seguridad Social de Colombia. **Resolución 2.400 de 1979**. Por la cual se establecen algunas disposiciones sobre vivienda, higiene y seguridad en los establecimientos de trabajo. 1979.

COUTO, H. de A. **Ergonomia aplicada ao trabalho**: o manual técnico da máquina humana. Belo Horizonte, MG: Ergo, 1995. v. 1, 353 p.

FANGER, P.O. **Thermal comfort analysis and application in environmental design**. New York, NY: MacGraw-Hill, 1972.

FOUCQUIER, A. et al. State of the art in building modelling and energy performances prediction: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 23, p. 272-288, 2013.

HERRERA, J.A.A. et al. Evaluación de estrés térmico en una empresa productora de alimentos en Córdoba-Colombia. **Revista Clepsidra**, v. 10, n. 19, p. 113-124, 2015.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 7243 - hot environments**: estimation of the heat stress on working man, based on the WBGT index (wet bulb globe temperature). Geneva, Suíça, 1982.

KIM, K. et al. 3-D CFD analysis of relative humidity distribution in greenhouse with a fog cooling system and refrigerative dehumidifiers. **Biosystems Engineering**, v. 100, n. 2, p. 245-255, 2008.

LABORATÓRIO DE EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM EDIFICAÇÕES – LABEEEE. Disponível em: <<http://www.labeee.ufsc.br/>>. Acesso em: 02 maio 2016.

LAMBERTS, R.; XAVIER, A. A.; GOULART, S. **Conforto e stress térmico**. LabEEEE, UFSC, 2011.

NAVARRO, S.; NOYES, R.T. **The mechanics and physics of modern grain aeration management**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2001.

NORTON, T. et al. Assessing the ventilation effectiveness of naturally ventilated livestock buildings under wind dominated conditions using computational fluid dynamics. **Biosystems Engineering**, v. 103, n. 1, p. 78-99, 2009.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. **Environmental assessment and optimization of facilities for coffee processing**. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2016.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of a thermal environment in two buildings for the wet processing of coffee. **DYNA**, v. 82, n. 194, p. 214-220, 2015.

OSÓRIO HERNANDEZ, R. et al. Simulation of the internal environment of a post-harvest installation and a solar dryer of coffee. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 2, p. 163-168, 2016.

PÉREZ RENDÓN, E.P.; RAMÍREZ BUILES, V.H.; PEÑA QUIÑONES, A.J. Variabilidad espacial y temporal de la temperatura del aire en la zona cafetera colombiana. **Investigaciones Geográficas**, n. 89, p. 23-40, 2016.

PUERTA QUINTERO, G.I. Especificaciones de origen y buena calidad del café de Colombia. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 316, p. 1-8, 2003.

PUERTA QUINTERO, G.I. Riesgos para la calidad y la inocuidad del café en el secado. **Avances Técnicos CENICAFE**, n. 371, p. 1-8, 2008.

ROCHA, K.S.O. et al. Three-dimensional modeling and simulation of heat and mass transfer processes in porous media: an application for maize stored in a flat bin. **Drying Technology**, v. 31, n. 10, p. 1099-1106, 2013.

SÁNCHEZ, L.M. La contabilidad en la conservación del paisaje cultural cafetero: retos y posibilidades. **Anuario Facultad de Ciencias Económicas y Empresariales**, v. 8, p. 57-70, 2016.

STULL, R. Wet-bulb temperature from relative humidity and air temperature. **Journal of Applied Meteorology and Climatology**, v. 50, n. 11, p. 2267-2269, 2011.

TAN, G.; GLICKSMAN, L.R. Application of integrating multi-zone model with CFD simulation to natural ventilation prediction. **Energy and Buildings**, v. 37, n. 10, p. 1049-1057, 2005.

TU, J.; YEOH, G.H.; LIU, C. **Computational fluid dynamics**: a practical approach. 2007.

UNITED STATES. Department of Energy. Energyplus. **The encyclopedic reference to EnergyPlus input and output**. Champaign, IL: University of Illinois, 2014.

UNITED STATES. Department of Energy. Energyplus. **The reference to EnergyPlus calculations**. Champaign, IL: University of Illinois, 2012. 847 p.

VAZ, J. et al. Experimental and numerical analysis of an earth–air heat exchanger. **Energy and Buildings**, v. 43, n. 9, p. 2476-2482, 2011.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES GERAIS

A partir do desenvolvimento dos quatro capítulos desta pesquisa e dos resultados obtidos, foi possível lograr o objetivo de avaliar a ambiência e bem-estar em unidades de processamento de café por via úmida, tanto para o café quanto para os operários, buscando otimizar as construções através de modificações que deram lugar a novos projetos.

Com base na diferença da forma arquitetônica das instalações estudadas, foi possível caracterizar três tipologias arquitetônicas das unidades para processamento úmido de café, representativas no estado de Antioquia, Colômbia, sendo a tipologia 1 definida como prisma retangular com chaminé e moega superiores; tipologia 2 definida como planta quase quadrada, rodeada de construções adossadas e moega superior; e tipologia 3 definida como planta retangular escalonada e moega seca superior sobre um de seus desníveis. Este estudo propiciou a seleção das unidades de processamento de café por via úmida, a fim de realizar a avaliação e otimização na ergonomia e ambiência posteriores.

Na avaliação ergonômica, na carga física de trabalho, as atividades das três tipologias estiveram fora das categorias que representam perigo para a saúde dos trabalhadores, enquanto na análise postural, os maiores riscos ergonômicos foram encontrados nas tarefas desenvolvidas de forma manual, como despolpamento, lavagem e classificação hidráulica nas tipologias 1 e 2, e alimentação do combustível da secadora e embalagem do café na tipologia 3. Treinamentos para adoção de posturas seguras, alternância de trabalho entre vários operários e pausas em posição sentada conforme a NR17, como medidas corretivas imediatas foram recomendados. Em médio e longo prazo, foram recomendadas automatização dos processos e modificações nas instalações.

Na avaliação de temperatura e umidade relativa do ar através de mapeamento, foram evidenciados problemas nas três tipologias para propiciar um ambiente que conservasse a qualidade do café, enquanto a umidade relativa do ar foi o problema principal nas condições para trabalhadores. Foi proposto um modelo de simulação capaz de prever o comportamento higrotérmico dentro das três tipologias. A partir desse modelo foi possível calcular o IBUTG para as três instalações, cujo limite não foi superado por nenhuma. Com base no mesmo modelo, observou-se que a temperatura do ar nas três tipologias superou o limite recomendado para conservar a qualidade do café armazenado, e a umidade relativa também não atingiu a faixa recomendada. O mesmo

modelo de simulação evidenciou que o gasto energético nas três instalações dependeu do tipo de combustível utilizado no trocador de calor das secadoras, sendo o gás o mais eficiente energeticamente e de menor efeito sobre o ambiente térmico, mas o custo econômico dependeu da sua disponibilidade; a casca de café tem maior disponibilidade, sendo, portanto, mais econômica no local de estudo.

Quanto à otimização das condições ambientais para o café e para os operários, nas instalações em estudo, ela foi possível graças ao fato de que, nas simulações com EnergyPlusTM, as médias da umidade relativa do ar das três tipologias, com os tratamentos propostos no GP1 e GP2, atingiram a faixa recomendada para conservar a qualidade do café na zona de armazenagem; embora as médias da temperatura do ar tenham superado em geral o limite recomendado, principalmente na zona de armazenamento, as simulações com CFD mostraram que, a distribuição espacial da temperatura nesta zona permite armazenar o café em condições adequadas para as tipologias 1 e 3. Na análise do IBUTG, as três tipologias apresentaram bom comportamento no GP1 e GP2.

A divisão e separação espacial das tipologias estudadas em zona úmida, zona seca e zona de armazenagem, com o trocador de calor externo, determinaram a otimização das condições ambientais dessas instalações, o qual indica que tal modificação pode ser uma proposta viável para melhorar o ambiente do trabalhador e do café nessas instalações representativas das tipologias arquitetônicas de unidades de processamento úmido de café no estado de Antioquia, Colômbia, as quais podem ser encontradas em toda a zona cafeeira colombiana, pelo fato de compartilharem a mesma cultura dos cafeicultores, as características climáticas, geográficas, entre outras.

A viabilidade dessa proposta de modificação pode se fortalecer com o fato de que unicamente implica construir divisórias nas construções com as mesmas tipologias de instalação para processamento úmido de café, o que resulta fácil e econômico.

A seguir, outras recomendações derivadas desta pesquisa:

- Foi demonstrada a viabilidade da aplicação das metodologias utilizadas na avaliação ergonômica das atividades do processamento úmido de café; contudo, recomenda-se ampliar o tamanho da amostra (número de trabalhadores), para que haja maior representatividade do setor, a fim de obter resultados que correspondam à generalidade.
- Em futuros trabalhos, tanto nas simulações a partir do EnergyPlusTM aplicadas na zona de armazenamento, quanto nas simulações com o CFD, recomenda-se incluir o volume

do café armazenado, já que ele é um material higroscópico com propriedades térmicas similares às da madeira, o que pode influenciar no comportamento higrotérmico da zona.

- Segundo os resultados das simulações com o CFD das condições higrotérmicas na zona de armazenagem do café nas tipologias em estudo, estas melhoraram bastante com a separação física da zona. Entretanto, é recomendável aumentar o número de perfis gerados com o CFD por cada zona de armazenamento, cujos resultados possam complementar os que já foram obtidos e fazer uma análise mais aprofundada.