



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

IANE OLIVEIRA DO NASCIMENTO

MINIMIZAÇÃO ENTRÓPICA APLICADA A SECADORES
ROTATIVOS

Campina Grande – Paraíba
2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

MINIMIZAÇÃO ENTRÓPICA APLICADA A SECADORES ROTATIVOS

Dissertação de Mestrado
apresentado ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia
Química da Universidade Federal
de Campina Grande, como
requisito parcial para obtenção do
título de Mestrado em Engenharia
Química.

Autor: Iane Oliveira do Nascimento

Orientador: Prof. Dr. João Teotônio Manzi

Campina Grande – Paraíba

2017

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

N244m Nascimento, Iane Oliveira do.
Minimização entrópica aplicada a secadores rotativos / Iane Oliveira do Nascimento. – Campina Grande, 2017.
77 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2017.
"Orientação: Prof. Dr. João Teotônio Manzi".
Referências.

I. Minimização Entrópica. 2. Secagem. 3. Modelagem. 4. Entropia. I. Manzi, João Teotônio. II. Título. Título.

CDU 66.01(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DE DISSERTAÇÃO
DA ALUNA IANE OLIVEIRA DO NASCIMENTO

TÍTULO: Minimização Entrópica Aplicada a Secadores Rotativos.

COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. João Teotônio Manzi M. de Araújo (Doutor)

(Orientador)

Aprovado

Prof. José Nilton Silva (Doutor)

(Examinador Interno)

APROVADO

Prof. Fernando Fernandes Vieira (Doutor)

(Examinador Externo)

APROVADO

Campina Grande, 17 de novembro de 2017



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA QUÍMICA

MINIMIZAÇÃO ENTRÓPICA A SECADORES ROTATIVOS

PROJETO APRESENTADO EM: ____/____/____

EXAMINADORES:

Prof. Dr. João Teotônio Manzi
Orientador

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira
Examinador

Prof. Dr. José Nilton Silva
Examinador

Campina Grande – Paraíba

2017

RESUMO

A busca por processos otimizados e rentáveis é constante no setor industrial. A utilização de uma abordagem clássica, fundamentada nas transferências de massa, calor e movimento, é geralmente a opção utilizada para realizar análises dos sistemas, porém nos últimos anos, além de conceitos usuais, a utilização de conceitos termodinâmicos, da mecânica dos fluidos e técnicas de otimização termodinâmica de processos também estão sendo utilizados a fim de determinar parâmetros ótimos de operação do sistema. Esta ferramenta tem sido explorada sendo conhecida como Minimização da Taxa de Geração de Entropia (MGE). Sua utilização vem apresentando bons resultados de otimização quando aplicada a sistemas reativos e não reativos. As plantas industriais que possuem o processo de secagem têm procurado torná-la uma operação mais rentável uma vez que esta operação consiste em elevado consumo energético e consequentemente alto custo operacional. O trabalho em questão consiste na aplicação da metodologia de MGE em um sistema de secagem de grãos utilizando secadores rotativos. A aplicação teve como resultado uma curva do perfil de temperatura com comportamento menos acentuado quando comparado com o perfil usual determinado a partir do balanço de energia. O perfil obtido com a utilização da MGE pode acarretar em um custo energético menor no processo de secagem. Além disso, a utilização do método nos cálculos de projetos dos secadores rotativos na secagem de grãos de milho pode levar a equipamentos com dimensões mais econômicas, com comprimento reduzido sem interferência na eficiência do processo.

PALAVRAS-CHAVE: Minimização Entrópica, Secagem, Modelagem, Entropia.

ABSTRACT

The search for optimized and profitable processes is constant in the industrial sector. The use of a classical approach, based on mass, heat and motion transfers, is usually the option used to perform systems analysis, but in recent years, in addition to usual concepts, the use of thermodynamic concepts, fluid mechanics and techniques of thermodynamic process optimization are also being used in order to determine optimal parameters for system operation. This tool has been explored known as Entropy Generation Rate Minimization (MGE). Its use has shown good optimization results when applied to reactive and non-reactive systems. The industrial plants that have the drying process have tried to make it a more profitable operation since this operation consists of high energy consumption and consequently high operating cost. The work in question is the application of the MGE methodology in a grain drying system using rotary dryers. The application resulted in a temperature profile curve with less pronounced behavior when compared to the usual profile determined from the energy balance. The profile obtained with the use of MGE may lead to a lower energy cost in the drying process. Moreover, the use of the method in the design calculations of rotary dryers in the drying of corn kernels can lead to equipment with more economic dimensions, with reduced length without interference in the efficiency of the process.

KEYWORDS: Entropy Minimization, Drying, Modeling, Entropy

Lista de Figuras

Figura 1- Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido.	23
Figura 2- Curvas típicas do processo de secagem.	24
Figura 3- Esquema de um secador rotatório com cascadeamento.	28
Figura 4(a)– Secagem natural de grãos.	32
Figura 4(b)– Secagem de grãos com ventilação forçada.	32
Figura 5- Sistema de secagem de grãos.	32
Figura 6– Representação de um elemento de controle no volume cilíndrico	34
Figura 7– Esquema de fluxo mássico em um elemento de volume cilíndrico	34
Figura 8– Esquema do fluxo de energia em um elemento de volume cilíndrico	38
Figura 9– Esquema do fluxo de entropia em um elemento de volume cilíndrico	47
Figura 10- Interdisciplinaridade do processo de MGE.	52
Figura 11– Sistema de secagem de grãos.	54
Figura 12- Comportamento da umidade (%bu) ao longo do secador (m)	62
Figura 13(a)- Perfil de temperatura do grão ao longo do processo de aquecimento	64
Figura 13(b)- Perfil de temperatura do grão ao longo do processo de resfriamento	64
Figura 15- Perfil de temperatura do meio secante ao longo do comprimento do secador	65
Figura 16 Perfil da taxa de geração de entropia ao longo do comprimento do secador .	65
Figura 17 Comparação entre perfis de temperatura do grão ao longo do secador: Perfil normal x Perfil com minimização entrópica	65

Lista de Tabelas

Tabela 1-Critérios para a classificação de secadores.....	26
Tabela 2- Modelos de equação para determinação do teor de umidade no processo de secagem.....	37
Tabela 3 -Modelos de equação para determinação do perfil energético ao longo do secador.	44
Tabela 4- Dados do sistema de secagem do milho grão.....	60

Lista de Símbolos

A_r, A_θ, A_z	Áreas da secção transversais correspondentes às coordenadas cilíndricas
C_i	Concentração da substância “i”
$D_{A,B}$	Coefficiente de difusão da espécie A em B
J	Unidade de medida de energia - Joule
j_i	Fluxo de massa molecular da substância “i”
J_i	Fluxo difusivo da substância “i”
K	Unidade de medida de temperatura absoluta (K)
k	Condutividade térmica (W/(m.K))
n	Número de mols total
n_i	Número de mols da substância “i”
P	Pressão (atm)
q_i	Taxa de transferência de calor por condução perpendicular a superfície
q''_i	Fluxo térmico
\dot{q}	Taxa de geração de energia térmica
r	Raio do cilindro (m)
r_i	Velocidade de reação em relação a substância “i”
s_r, s_θ, s_z	Entropia específica do todo em relação as coordenadas cilíndricas
σ	Taxa de geração de entropia (kJ/kg.K)
T	Temperatura (K)
t	Tempo (s)
\vec{v}	Vetor velocidade (m/s)
v_r, v_θ, v_z	Velocidade correspondente aos eixos coordenados (m/s)
V	Volume (m ³)
ΔH	Varição de entalpia
ρ_i	Densidade da substância “i” (kg/m ³)
U	Energia interna (J)
S	Entropia do sistema (kJ/K)
E_c	Energia cinética (m/s ²)
E_p	Energia potencial (m/s)
G	Energia Livre de Gibbs (J)

Lista de Abreviaturas

MGE- Minimização de Geração de Entropia

SI – Sistema Internacional

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento

MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento

ANVISA- Agência Nacional de Vigilância Sanitária

Sumário

1.0 INTRODUÇÃO.....	14
2.0 OBJETIVO	17
2.1 OBJETIVO GERAL	17
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1 ENTROPIA	18
3.2 MODELAGEM DE SECADORE ROTATIVOS.....	21
4.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	23
4.1 SECAGEM.....	23
4.2 SECAGEM DE GRÃOS.....	28
4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	30
4.4 PROCESSO DE SECAGEM	32
4.4.1 BALANÇO DE MASSA	33
4.4.2 BALANÇO DE ENERGIA.....	38
4.4.3 BALANÇO DE ENTROPIA	45
5.0 METODOLOGIA.....	54
5.1 SISTEMA DE SECAGEM DE GRÃOS	54
5.2 BALANÇO DE MASSA- DESENVOLVIMENTO	55
5.3 BALANÇO DE ENERGIA- DESENVOLVIMENTO.....	56
5.4 BALANÇO DE ENTROPIA- DESENVOLVIMENTO.....	56
6.0 MODELAGEM DO PROCESSO	56
7.0 SIMULAÇÃO	60
8.0 RESULTADOS E DISCURSÕES	62
9.0 CONCLUSÃO.....	69
10.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70

A Deus, aos meus pais, irmãs,
familiares e amigos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, que sempre me dá oportunidades e me capacitar para que consiga alcançar os objetivos que tenho traçados para minha vida.

Agradeço aos meus pais, Ivanilda Oliveira e Inácio Geraldo, que sempre me incentivam a buscar de novos conhecimentos e ideais. Obrigada por apoiar meus projetos, acreditar na minha capacidade, encorajar nos momentos de fraqueza e pelo incentivo constante.

Agradeço as minhas irmãs Isabela Oliveira e Ithiara Oliveira por acreditarem e incentivarem meus projetos.

Aos amigos e colegas por fazerem parte da minha vida e da minha história tanto acadêmica como pessoal.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. João Teotônio Manzi pela orientação e paciência ao longo desse projeto.

A Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, ao Departamento de Engenharia Química.

Ao CNPq pelo o incentivo a pesquisa.

Agradeço a todos!

*“Descobrir consiste em olhar para o
que todo mundo está vendo e pensar uma coisa diferente”.*
(Roger Von Oech)

*“Por vezes sentimos que aquilo que
fazemos não é senão uma gota de água no mar. Mas o mar seria menor se lhe faltasse uma
gota”.*
(Madre Teresa de Calcuta)

1.0 INTRODUÇÃO

A busca por um melhor aproveitamento dos recursos energéticos é uma necessidade constante no setor industrial motivada por competições mercadológicas, gerenciamento de custos e restrições ambientais. A energia, em suas diversas formas e usos, representa um insumo indispensável aos mais variados setores da indústria (SANTOS, 2007).

Dados do Balanço Energético Nacional 2015, divulgados pela Agência Nacional de Minas e Energia, afirmam que a indústria brasileira é responsável pelo consumo de 34% da energia produzida no país.

A necessidade de implementar alternativas energéticas para um melhor aproveitamento de recursos naturais direcionados à indústria vem estimulando a inserção de novas ferramentas nos processos industriais para otimização dos sistemas afim de extrair maior rendimento e atingir os objetivos determinados para o processo.

A rentabilidade de uma indústria está diretamente relacionada à forma com que seus recursos energéticos são empregados. Sendo assim, destacam-se plantas que possuem menores gastos e maior reaproveitamento energético. Desta forma, a indústria necessita aperfeiçoar cada vez mais o (re) aproveitamento de energia, uma vez que isto pode diminuir o custo do processo (SILVA et. al., 2012).

Na análise de sistemas, geralmente utiliza-se da abordagem clássica baseando-se nos fundamentos de balanço de massa e energia. A utilização de conceitos termodinâmicos alinhados com técnicas de otimização de processos são ferramentas utilizadas para atingir os objetivos de controle desses processos. Sabendo que a Primeira Lei da Termodinâmica trata da conservação de energia e não impõe restrições sobre fluxo de entropia do sistema, o uso da Segunda Lei da Termodinâmica possibilita impor as restrições à direção do fluxo de energia do sistema, regulando e considerando as restrições naturais do processo.

De acordo com a literatura clássica, a Segunda Lei da Termodinâmica disserta sobre a função conhecida como Entropia. A entropia trata da relação entre a Energia de Gibbs ($G = H - TS$) e a irreversibilidade ou espontaneidade de um sistema, conquanto que o uso da entropia como informação complementar sobre o sistema pode ajudar a determinar os parâmetros ótimos de operação do processo.

De acordo com Bispo et. al. (2009), a entropia expressa o número de micro configurações ou estados que um sistema possa ter, além de tratar da relação entre a taxa de geração de entropia e a produção de subprodutos em sistemas reativos. Assim, pode-se considerar que a operação de um sistema nas condições de taxa de produção de entropia mínima pode provocar redução no consumo de energia em etapas posteriores à reação além da otimização de processos.

De acordo com a Termodinâmica, a variação total da entropia do universo será positiva para que os processos sejam espontâneos. A variação da energia de Gibbs relaciona as variações de entalpia e entropia do sistema, $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, logo a energia de Gibbs se relaciona diretamente com as análises desenvolvidas na metodologia da Minimização de Geração de Entropia – MGE.

Apesar de os processos industriais geralmente ocorrerem em regime transiente, é possível determinar os pontos de operação quando analisados sob a condição de um regime estacionário. Neste cenário o processo pode ser avaliado sobre as condições de um sistema reversível, possibilitando o consumo mínimo de energia, através da Segunda Lei da Termodinâmica, implicando em uma nova configuração estrutural do sistema.

Tendo como objeto de trabalho a obtenção de um processo otimizado e sabendo que o cálculo da energia livre de Gibbs é uma correlação de forças entre a entalpia e entropia, pode-se dizer que a minimização da energia de Gibbs se relaciona diretamente com a minimização da variação de entropia.

Durante as últimas três décadas o método de minimização de geração de entropia tornou-se um procedimento bem utilizado na ciência térmica e engenharia. O método baseia-se na aplicação simultânea dos princípios de transferência de calor, e termodinâmica de engenharia, na busca de modelos realistas para transferência de calor nos processos, dispositivos e instalações (GIANGASPERO, et. al. 2011).

Segundo Manzi et. al. (2009), o uso da entropia vem se mostrando atrativa para determinar as condições ótimas de operação de processos químicos, especialmente quando as questões de produção e economia de energia são abordadas.

A utilização da estratégia de Minimização de Geração de Entrópica (MGE) foi utilizada em sistemas reativos e não reativos e apresentou bons resultados quanto à determinação de parâmetros de operação otimizados.

Neste trabalho, a aplicação do método MGE será realizada no sistema de secagem de grãos utilizando secador rotativo. A secagem será abordada por ser considerada “*energy intensive process*” (processo que demanda elevada carga

energética). Estima-se que a secagem consome cerca de 40% da energia das plantas que a utilizam caracterizando-a como uma operação pouco rentável devido seu alto consumo de energia.

Por ser considerada uma operação onerosa, a secagem é objeto constante de estudos nos setores industriais e de projetos. Baseado nos resultados obtidos com a utilização da Minimização de Taxa de Geração de Entropia para sistemas diversos, esta pode ser uma estratégia a ser utilizada no sistema de secagem de grãos para a determinação de parâmetros ótimos de operação e conseqüentemente a obtenção de um processo otimizado e rentável.

O processo de secagem aplicada a grãos de milho é realizado com o objetivo de reduzir o teor de umidade sem perdas relacionadas a qualidade do produto durante transporte e/ou armazenamento. Geralmente a secagem é conduzida em silos com passagem de ar ou o método usual de secagem natural, porém em estudos realizados por Costa et. al. (2010) o uso de secadores rotativos para este tipo de produto apresentou bons resultados de consumo de energia e não afetou a qualidade dos grãos.

A utilização do método de MGE no processo de secagem pode trazer uma nova perspectiva para o setor industrial e agrícola, que tem uma grande representatividade na economia brasileira, que terá uma nova ferramenta de estudo para determinação de parâmetros ótimos de operação de processo e projetos.

2.0 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo deste projeto é propor um modelo matemático para análise e otimização do sistema de secagem de grãos, aplicado a secadores rotativos, a fim de desenvolver um processo mais econômico tanto em questão de energética quanto de custos operacionais, aplicando a metodologia de minimização da taxa de geração de entropia.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolver uma modelagem para o processo a partir dos balanços de massa e energia, além de conceitos termodinâmicos;
- Com a utilização do modelo obtido, realizar a simulação do processo com dados obtidos na literatura.

3.0 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 ENTROPIA

Entropia é uma grandeza termodinâmica que mensura o grau de irreversibilidade do sistema expressando o seu número de micro configurações.

No Sistema Internacional de Unidades (SI), tem a dimensão de energia medida em Joule (J) por unidade de temperatura absoluta em Kelvin (K).

Originalmente a palavra entropia surgiu de uma palavra cunhada no grego “*εντροπία*” (entropía) cujo significado seria “o ato de virar, transformar” (*en* - em, sobre, perto de...) e *sqopg* (*tropêe* - mudança, o voltar-se, alternativa, troca, evolução).

No entanto, foi a partir dos trabalhos de Sadi Carnot, em 1831, o qual buscava investigar as propriedades dos gases, que foi introduzida a ideia de transformações cíclicas, concluindo-se que o calor poderia ser convertido em trabalho, mas não por completo. Seus estudos e conclusões foram reafirmados por Rudolf Clausius, em 1865, o qual desenvolveu a expressão correta para a representação do ciclo de Carnot, fundamentou e estabeleceu as leis essenciais da termodinâmica. Além do mais, a primeira conceituação dada para a entropia foi elaborada por Clausius.

Estudos de Willard Gibbs, James Maxwell, Ludwig Boltzmann apresentaram grandes contribuições na área da teoria cinética e desenvolveram a base estatística da entropia, em meados do século XVIII, o que ampliou o seu campo de atuação devido a sua grande importância e aplicabilidade.

Contudo, o físico-químico russo Ilya Prigogine foi o responsável pelo desenvolvimento da base da análise da geração de entropia e a compreensão dos processos termodinâmicos irreversíveis.

Sabendo-se que a entropia é uma propriedade de estado e que esta fornece uma medida quantitativa que descreve a tendência da energia fluir em uma determinada direção, tal medida pode ser usada para a análise do estado de equilíbrio como uma metodologia utilizando os balanços de massa e energia associados ao balanço entrópico, além de ser considerada uma ferramenta aplicável para análise e otimização de processos (BISPO, 2009).

Devido ao fato da Primeira Lei da Termodinâmica não estabelecer nenhuma restrição acerca da direção do fluxo de calor, faz-se necessário o desenvolver um balanço substancialmente completo de energia, o qual recai sobre a Segunda Lei da

Termodinâmica, com a especificação das diretrizes e condições da ocorrência e fluxo de calor (GOMES, 2013).

Nas últimas três décadas essa metodologia vem sendo utilizada e aprimorada, ela é conhecida como “Minimização da taxa de geração de entropia” e baseia-se em um método analítico usado para a modelagem, simulação e otimização de funções termodinâmicas aplicadas a sistemas e equipamentos reais. A partir dessa metodologia é possível minimizar as irreversibilidades dos sistemas quando considerado o termo de geração de taxa de entropia.

De acordo Bejan (1996), em seu artigo intitulado “*Entropy Generation Minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes*”, o método de minimização entrópica combina os conceitos básicos da termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos. Ele também afirma que esse método vem ganhando destaque nas áreas de engenharia desde a década de 1970 devido as notáveis aplicações na criogenia, operações de transferência de calor, conversão de energia solar e educação.

Ainda segundo Adrian Bejan (1996) “O aspecto interdisciplinar mais emocionante e promissor do método é que ele também combina interesses de pesquisa de engenharia e física”. Bejan é um dos autores que vem contribuindo de modo muito significativo para o desenvolvimento e aprimoramento dos conceitos entorno da análise entrópica.

De acordo com Bejan (2007) em seu artigo publicado “*Constructal theory of pattern formation*” existem dois grupos de pesquisa que se destacam em relação à forma de selecionar e otimizar o sistema, seja por meio da produção entrópica (ou máxima dissipação) com trabalhos de pesquisadores como Paltridge, North, Lin, Lorentz et al. e Dewar, ou por meio da mínima geração de entropia, onde são citados trabalhos como os de Hess, Murray, Thompson, Bejan, Rodriguez - Iturbe e Rinaldo e Weibel.

Na área de mínima produção entrópica, é possível citar o trabalho desenvolvido por Kjelstrup et.al.(2004) o qual apresenta um procedimento matemático para a determinação da distribuição da força motriz em um reator químico para que este tenha o mínimo de trabalho perdido para uma dada taxa de produção.

Halvorsen e Skogestad (2001) desenvolveram um estudo sobre a utilização da Segunda Lei da Termodinâmica em torres de destilação. Segundo os autores, fez-se necessária a utilização da segunda lei para obter uma análise mais completa do processo, o que os levou a resultados interessantes, uma vez que obtiveram

configurações de associação de equipamentos com consumos de energia menores que as configurações convencionais.

Em 2004, Johannessen et. al., observou que essa metodologia se encontrava bem estabelecida para muitos tipos de equipamentos de processos, no entanto, ainda não haviam sido estabelecidos estudos envolvendo reatores químicos. Ele, então, apresentou uma forma de minimizar a taxa de produção de entropia em reatores do tipo *Plug Flow Reactor (PFR)* com várias reações e com a temperatura do fluido de arrefecimento/aquecimento variável, através da teoria do controle otimizado.

Manzi e Carrazzoni (2008) estudaram um reator do tipo CSTR, onde uma reação irreversível, exotérmica e de primeira ordem ocorre. Utilizando as equações do balanço de massa, energia e entropia, os autores obtiveram uma equação que descreve a taxa de geração de entropia do sistema. Esta equação foi utilizada para obter uma relação entre a temperatura de alimentação e a temperatura da reação, podendo assim determinar a temperatura ótima de operação para a qual a taxa de produção de entropia do sistema é mínima.

Em 2009, Manzi et. al., aplicaram o método de minimização da taxa de produção de entropia à produção de propileno glicol e observaram que uma mínima taxa de produção de entropia pode ser obtida para uma determinada relação entre as temperaturas de entrada e de reação, considerando o tempo de residência no reator. Dessa forma, novas condições operacionais para o processo de produção do propileno glicol foram estabelecidas, promovendo um aumento significativo na taxa de conversão da reação quando operado sob mínima produção de entropia.

Além da otimização das variáveis de projeto, a minimização da taxa de geração de entropia pode ser utilizada para determinar uma forma mais eficiente de se realizar o controle de um processo. Uma possibilidade seria o uso da quantidade total de energia empregada/disponível no processo como parâmetro de eficiência, de acordo com a 1ª Lei da Termodinâmica. No entanto essa abordagem não considera a irreversibilidade do processo, ou seja, a qualidade com que tal energia é empregada, de modo que conceitos derivados da 2ª Lei da Termodinâmica, tais como exergia e taxa de geração de entropia tem sido utilizado para aumentar a eficiência termodinâmica através da teoria do controle ótimo (PAIM, 2013).

Diante da variedade nas aplicações do MGE, é possível aplicar a metodologia em operações de secagem, mais especificamente na secagem de grãos.

De acordo com dados divulgados pela Companhia Nacional de Abastecimento-CONAB no Acompanhamento de Safra Brasileira de Grãos 2015/2016, estima-se que a produção de grãos alcance cerca de 189,3 milhões de toneladas, o que torna a busca por procedimentos de conservação dos grãos uma prática necessária.

Com relação ao cultivo do milho, apesar da queda consecutiva de produção nas últimas três safras em consequência da perda de área de plantio para a soja, o Brasil ainda é o terceiro maior produtor no mundo, ficando atrás apenas dos Estados Unidos e da China.

A utilização da MGE na secagem de grão é uma alternativa a ser empregada no setor agrícola, que busca constantemente a aplicação de métodos científicos no setor, a fim de tornar esta operação viável economicamente atendendo as expectativas dos produtores.

3.2 MODELAGEM DE SECADORE ROTATIVOS

A aplicação do processo de secagem é ampla no setor industrial e várias são as análises de modelagem e estudo sobre a dinâmica dos secadores realizadas a fim de um melhor entendimento desta operação.

Diante dos inúmeros tipos de secadores existentes no mercado, os secadores rotativos se destacam devido sua variedade de aplicações.

Tsao et.al. (1967) em “*Drying Theory and Calculation*” mostra um conjunto completo e simplificado sobre os cálculos para o processo de secagem. O autor utiliza da teoria básica e de cálculos da operação de secagem como guia para projeção e otimização de secadores e processo de secagem.

Péres-Correa et. al. (1998) em seu artigo intitulado “*Dynamic simulation and control of direct Rotary dryers*” realizou simulações sobre a dinâmica do secador rotativo, utilizando da modelagem desenvolvida a partir de balanços de massa e energia, incluindo a cinética de secagem derivada dos princípios de transferência de massa.

Savaresi, et. al. (2001) em “*On Modelling and control of a rotary sugar dryer*”, utilizou da modelagem matemática do secador para análise de um conjunto de dados do processo de secagem de açúcar. Com um modelo restrito, determinaram-se dois tipos de zonas de secagem no secador e foi proposto, com base no comportamento em duas fases, um ajuste preciso entre o modelo e os dados medidos, conseguindo assim uma nova estratégia de controle.

Iguaz el. al. (2003) (*“Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer”*), utilizou das análises de modelagem e simulação aplicadas a secadores rotativos no estudo do processo de secagem no setor agroindustrial, propondo um modelo, baseado nos fenômenos de transferência de massa e energia, que descreve o processo de desidratação dos resíduos de vegetais para o consumo animal, levando em consideração a dependência das características do produto com as condições de trabalho do secador.

Lisboa et.al. (2004) (*“Study of performance of the rotary dryer with fluidization”*), utilizou das análises de modelagem para comparar a eficiência do secador rotativo convencional e o secador rotativo fluidizados na secagem de fertilizantes flocculados. Os estudos mostraram que, para as mesmas condições de análise, a temperatura de saída do sólido, o coeficiente global de transferência de calor e a velocidade de secagem formam maiores no secador fluidizado que no convencional.

De maneira geral, a modelagem de diversos equipamentos é realizada levando em consideração as transferências de massa e calor do sistema. Quando falamos de secadores rotativos o cenário não é diferente, o uso das informações de transferência aliadas a conceitos termodinâmicos é utilizado para obtenção de equações que descrevem os perfis de umidade e temperatura ao longo do tempo de secagem.

Costa et. al. (2010) (*“Análise de custos de sistema de secagem de milho em secadores mecânicos”*), analisou a viabilidade do uso do secador mecânico com distribuição radial de ar, utilizado geralmente para secagem de café, para a secagem do milho. Foram analisados dois tipos de secadores, comercial e modificado, em condições de operação controlada, utilizando a metodologia clássica, e verificou-se, a partir dos dados obtidos, o menor consumo específico de energia no secador rotativo modificado, além de uma melhor susceptibilidade à quebra do grão.

Diante dos bons resultados obtidos com a utilização da metodologia de Minimização de Geração de Entropia (MGE), aplicados a sistemas reativos e não reativos, podemos considerar a utilização desta abordagem mais ampla em secadores rotativos a fim de determinar os parâmetros ótimos de operação, otimizando o sistema e o tornando viável economicamente.

4.0 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

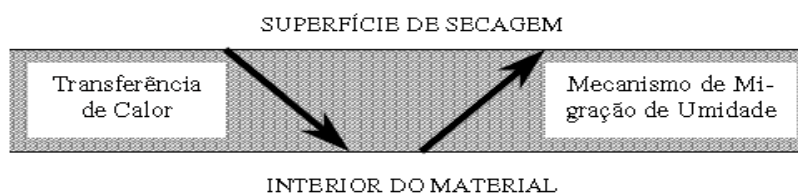
4.1 SECAGEM

O processo de secagem é uma necessidade presente no cotidiano da humanidade e o aperfeiçoamento deste processo é o objeto de estudo de desenvolvimento. O sol e o vento já foram as principais formas de secagem e apesar de ainda usados em circunstâncias especiais, são muito lentos e não se aplicam a grandes quantidades de material.

Os avanços científicos têm permitido a criação de equipamentos cada vez melhores desde os rudimentares fornos da Idade do Ferro aos modernos secadores por infravermelho e micro-ondas. A indústria moderna dispõe de inúmeros equipamentos de variados princípios de funcionamento, como os diversos secadores mecânicos e por radiação eletromagnética, mas o método mais utilizado é ainda a secagem por troca de calor (CRISTO, 2004).

Segundo Foust et. al. (1982), o termo secagem aplica-se a transferência de um líquido que está num sólido molhado para uma fase gasosa não saturada. O mecanismo de migração da água contida no sólido é governado pelos fenômenos de transferência de massa combinados com a transferência de calor no sistema de acordo com a Figura 1.

Figura 1- Diagrama da migração de umidade no interior de um sólido.

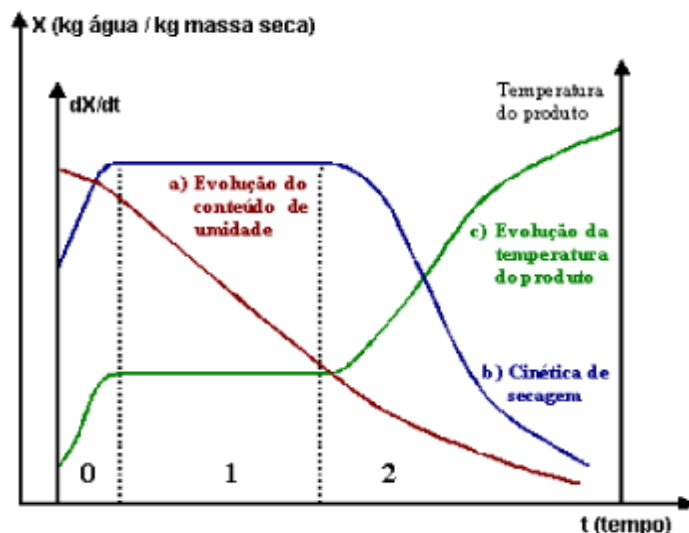


Fonte: Park, et.al. 2005

Apesar de parecer simples, parâmetros importantes afetam o processo de secagem e conseqüentemente as características físicas, químicas e biológicas do produto final. Assim parâmetros como tempo de secagem, velocidade do sistema e temperatura do meio secante, demais parâmetros significativos são objetos de avaliações constantes e grandes esforços são investidos para torna a operação mais rentável, mantendo ao mesmo tempo a qualidade do produto.

A secagem é geralmente analisada a partir das curvas características deste processo. A Figura 2 mostra as curvas de evolução do processo ao longo do tempo de secagem.

Figura 2- Curvas típicas do processo de secagem



Fonte: Park, et. al. 2001

A curva (a) representa a diminuição do teor de água do produto durante a secagem, conteúdo de umidade do produto em base seca (X), em relação à evolução do tempo de secagem (t), isto é, é a curva obtida pesando o produto durante a secagem numa determinada condição de operação. A curva (b) representa a velocidade de secagem do produto, ou seja, a variação de umidade do produto por tempo. Já a curva (c) representa a variação de temperatura do produto durante a secagem (Park, et. al 2001).

Outra forma de análise do processo é a partir da Análise do Predomínio das Forças no processo dividindo o mesmo em períodos distintos. As etapas do processo de secagem podem ser compreendidas de acordo com as forças que governam a operação que são o *Predomínio governado por fatores externos* e *Predomínio governado por fatores interno*.

Na faixa correspondente ao *predomínio dos fatores externos*, existe na interface líquido-vapor uma grande quantidade de moléculas de água, o que favorece a transferência de massa pelo processo convectivo e é geralmente conhecido como período de desidratação da superfície saturada do sólido. Neste momento diz-se que o teor de umidade é mínimo para suprir a totalidade da superfície, ou seja, que o sólido atingiu a *umidade crítica*.

Já durante o período que corresponde ao *predomínio de fatores internos*, ocorre o processo difusivo das moléculas para a interface do sólido que neste momento está pobre em componentes voláteis. O período decorrente é conhecido como período à taxa decrescente que segue até que o equilíbrio entre o sólido e o meio secante seja atingido, denominado como sendo a *umidade de equilíbrio* do sistema.

O teor de umidade de equilíbrio, segundo Foust et. al. (1982), é atingido quando a pressão de vapor sobre o sólido é igual à pressão parcial do vapor no gás secante afluyente.

A forma mais comum de classificação do processo de secagem é a *secagem mecânica* e a *secagem por difusão*. Já a classificação de um sistema pode ser determinada de acordo com o mecanismo ou material a ser submetido pelo processo de secagem.

A *secagem mecânica* é geralmente utilizada quando os materiais sólidos não se dissolvem em água e o produto resultante apresenta elevado teor de umidade residual. Já a *secagem por difusão* ocorre quando o processo difusivo apresenta um melhor aproveitamento no material. Este tipo de secagem depende da pressão de vapor d'água do material e da pressão parcial de vapor d'água no ar, além da superfície de contato do material com o ar envolvente.

Diante da variedade de materiais que passam por este processo, com base no comportamento do mecanismo de secagem, os materiais são divididos em duas classes. A primeira classe são os sólidos granulados ou cristalinos que detêm a umidade nos interstícios entre as partículas, ou em poros superficiais, rasos e abertos. Neste caso a secagem é realizada predominantemente por forças gravitacionais e de tensão superficial. Esses materiais em geral são inorgânicos.

A segunda classe é formada por compostos orgânicos, amorfos, fibrosos ou gelatinosos. Esse tipo de material retém a umidade como parte de sua estrutura no interior de fibras ou poros delgados internos. O movimento da secagem é lento e provavelmente ocorre pela difusão do líquido através da estrutura do sólido (Foust et. al., 1982).

Para cada grupo de material, com características específicas, um tipo de secador é projetado para obtenção de um material seco sem alteração em suas características. Dentre a grande variedade de secadores disponíveis no mercado, destaca-se o secador rotativo devido sua grande aplicabilidade setores diversos.

4.1.1 SECADORES ROTATIVOS

Devido à grande variedade de materiais que são submetidos ao processo de secagem e de suas características específicas, grande também é a variedade de secadores disponíveis no mercado.

De acordo com Park e Alonso (2005), uma vez que é necessário o uso da secagem em alguma etapa de processamento, o trabalho do engenheiro se desdobra. Ele deverá escolher um secador adequado que se integre no processo como um todo e, deverá comparar as vantagens e desvantagens dentre as várias alternativas disponíveis tomando em conta tanto o ponto de vista técnico como o econômico.

A secagem ocorre promovendo a vaporização do líquido fornecendo calor ao material úmido. O calor pode ser fornecido superficialmente por convecção (secadores diretos), por condução (secadores indiretos), por radiação ou volumetricamente colocando o material úmido em um campo eletromagnético de micro-ondas ou frequência de rádio. De acordo com Mujundar (1997) cerca de 85% dos secadores industriais são do tipo convectivo com ar quente ou gases de combustão utilizados como agente de secagem.

Em geral, os secadores são equipamentos de elevado custo, não somente em termos de aquisição e instalação como também devido à quantidade de energia que é consumida durante a operação. Segundo Strumillo e Kudra, 1986, os secadores podem ser assim divididos de acordo com a Tabela 1.

Tabela 1-Critérios para a classificação de secadores

Critério para classificação	Exemplo de tipo de secador
Pressão do secador	Atmosférica ou vácuo
Método de operação	Contínua ou batelada
Método de suprir o calor	Convecção, contato, infravermelho, dielétrico e sublimação.
Tipo de agente de secagem	Ar quente, vapor superaquecido, líquidos aquecidos e gases rejeitados.
Direção do fluxo de calor e sólido	Co-corrente, contracorrente e fluido cruzado.
Método do fluxo do agente de secagem	Livre ou forçada
Método do carregamento da umidade	Com agente externo de secagem, com gás inerte, com absorção química da umidade.
Forma do material úmido	Líquidos, granulares, pós, pastas, folhas, camadas finas, lama.
Tipo do fluxo do material (condição hidrodinâmica)	Regime estacionário, transiente ou disperso.
Escala de operação	De 10kg/h até 100ton/h
Construção do secador	Bandejas, túnel, esteira, tambor, rotativo, lento, fluidizado e muitos outros.

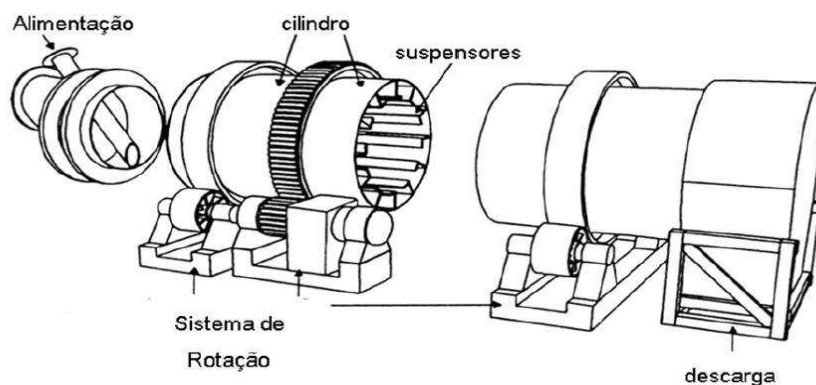
Fonte: Strumillo e Kudra (1986)

Dentre os diversos secadores disponíveis no mercado, o trabalho em questão trata sobre secadores rotativos, buscando compreender melhor o funcionamento deste equipamento e uma melhor definição de parâmetros de processos.

Secadores rotatórios são ideais para a secagem de materiais granulados de escoamento livre, sendo bastante empregados na secagem de sais, fertilizantes e areia. Podem ainda ser adaptados, com o uso de etapas preparatórias de material, para a secagem de pastas, lamas e soluções, aumentando sua alternativa de uso (NONHEBEL e MOSS, 1971; PERRY, 1999).

O secador rotatório é constituído de uma armação cilíndrica em aço carbono um pouco inclinada em relação a horizontal e que gira em torno de seu eixo longitudinal, como mostra o esquema da Figura 3.

Figura 3- Esquema de um secador rotatório com cascadeamento.



Fonte: ARRUDA, 2008

O comprimento da câmara cilíndrica deste secador normalmente varia de quatro a dez vezes o seu diâmetro, que pode medir de 0,3 m a mais de 3 metros (PERRY, 1999). O casco cilíndrico é dotado internamente de suspensores, que funcionam como pás carregando os sólidos da parte inferior para a superior, promovendo o cascadeamento do material, melhorando o contato gás-partícula e conseqüentemente aumentando a taxa de secagem.

Segundo Costa, et.al. (2010), a inclinação do cilindro com variação na faixa de 1 a 3% no sentido do deslocamento permite o deslocamento longitudinal por gravidade do material a secar. Por serem secadores de grande comprimento, a inclinação facilita no processo de escoamento do produto ao longo do secador.

4.2 SECAGEM DE GRÃOS

O Brasil é o terceiro maior produtor de milho no mundo, ficando os Estados Unidos e China em primeiro e segundo lugares respectivamente. Produzir em grande escala requer tecnologias que garantam a qualidade do produto no final da cadeia produtiva.

A secagem do milho pode ocorrer de forma natural ou artificial. A secagem natural faz uso da radiação da luz solar e do ar ambiente, já a secagem artificial dispõe das transferências de calor em sistemas mais eficientes.

A secagem natural do milho no campo é prática comum no Brasil, e ocorre, principalmente, pela facilidade, economia e falta de equipamentos de secagem artificial nas propriedades. Estima-se que de 20 a 30% da produção nacional de grãos é submetida à secagem artificial e de 70 a 80% da produção é secada a campo, de forma natural, permanecendo na lavoura até atingir o percentual de umidade ideal ao armazenamento, ou seja, na faixa de 13% de umidade (Pimentel, et. al. 2011).

Em escalas industriais, o processo de secagem ocorre de forma artificial e é realizada em secadores de alto custo que, apesar de tornar o processo mais produtivo, torna-o bastante oneroso. Este pode ser realizado por ventilação natural, ou ventilação forçada.

A ventilação natural (Figura 4a) utiliza a mesma fonte de calor que a secagem natural, que é a radiação solar. O processo consiste em retirar o produto do plantio e acondicioná-lo em camadas espessas em uma área aberta previamente preparada para que o processo de secagem aconteça. Este tipo de secagem é de baixo custo e baixo rendimento, pode propiciar a perda de material por facilitar o acesso a pragas, o campo fica ocupado por mais tempo, dificulta a colheita mecânica, entre outras desvantagens.

Já a ventilação forçada (Figura 4b) é realizada em silos com a utilização de ar com baixa temperatura e é caracterizado como um processo lento de secagem devido à relação entre o ar de secagem e a carga de material a ser seco não ser proporcional.

Figura 4a: Secagem de grãos com ventilação natural



Fonte: NUNES (2016).

Figura 4b: Secagem de grãos com ventilação forçada



Fonte: MF Rural 2017.

A utilização de secadores rotativos para a secagem de milho ainda é uma prática pouco empregada, porém com a diversificação de culturas nas áreas plantadas, as quedas consecutivas de produção de milho registrada nos últimos semestres, de acordo com o relatório de produção de grãos publicado pela CONAB (2016), a utilização deste tipo de secador para a secagem de milho é uma alternativa de redução de custos para os produtores.

Costa, et. al. (2010) realizou estudos sobre o processo de secagem de milho utilizando secadores rotativos, comumente utilizados no setor cafeeiro, e verificou bons resultados de qualidade, baixos custos e eficiência na utilização deste tipo de secador. O estudo realizado e os resultados obtidos podem ser uma fonte motivadora para que uma nova cultura possa ser utilizada em secadores rotativos no setor agrícola aumentando assim a produtividade deste setor.

4.3 MODELAGEM MATEMÁTICA

Segundo Secchi (1995), o interesse industrial em técnicas e pacotes computacionais para a modelagem e simulação de processos tem crescido muito nos últimos anos. Muitas ferramentas são aplicadas para análise de melhorias no processo de secagem com o objetivo de torná-la mais rentável apresentando menores gastos e um melhor aproveitamento energético.

A termodinâmica, que trata do fluxo de energia sob as condições de equilíbrio, ou melhor, próximas das do equilíbrio (BAUMAN, 1972), pode ser utilizada para análise do fluxo energético existente em equipamentos incluindo os secadores.

A modelagem nada mais é que uma das formas que os cientistas desenvolveram para representar os fenômenos através de modelos matemáticos. Esta técnica é extremamente útil na engenharia, relacionando os fenômenos físicos que ocorrem na natureza com as formulações matemáticas.

Um modelo matemático pode ser definido, de forma geral, como uma formulação ou equação que expressa às características essenciais de um sistema ou processo físico em termos matemáticos. Em um sentido geral ele pode ser representado como uma relação funcional da forma:

Variável dependente

$$= f(\text{variáveis independentes, parâmetros, funções forçantes})$$

Onde:

Variável dependente - é uma característica que normalmente reflete o comportamento ou estado do sistema;

Variáveis independentes normalmente são dimensões, como tempo e espaço, ao longo das quais o comportamento do sistema é determinado;

Parâmetros refletem propriedades ou composição do sistema;

Funções forçantes são as influências externas agindo sobre o sistema (CHAPRA, 2013).

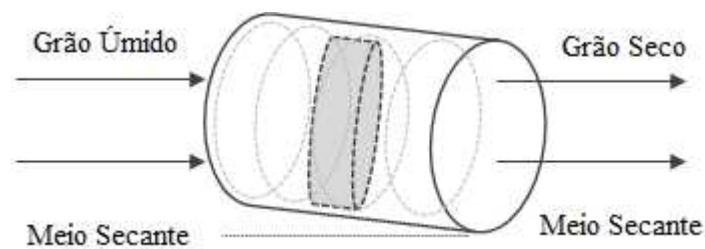
A necessidade por processos com maior controle, eficiência e reprodutibilidade quanto à qualidade dos seus produtos, tem introduzido na indústria, de uma forma geral, a tendência para a busca de processos integrados requerendo uma simulação de toda a planta com o uso de modelos que melhor representem os processos.

No processo de secagem a necessidade de torna-lo mais eficiente não é diferente. Devido à grande variedade de materiais presentes na natureza que passam por este processo, é possível encontrar na literatura diversos modelos que descrevem a secagem de maneira específica de acordo com o material e as características dos processos.

4.4 PROCESSO DE SECAGEM

A secagem de grãos consiste basicamente na retirada de umidade deste grão através de sua passagem por um meio secante onde ocorre a transferência de calor de forma direta ou indireta. A Figura 5 representa o esquema do sistema de secagem em um secador rotativo.

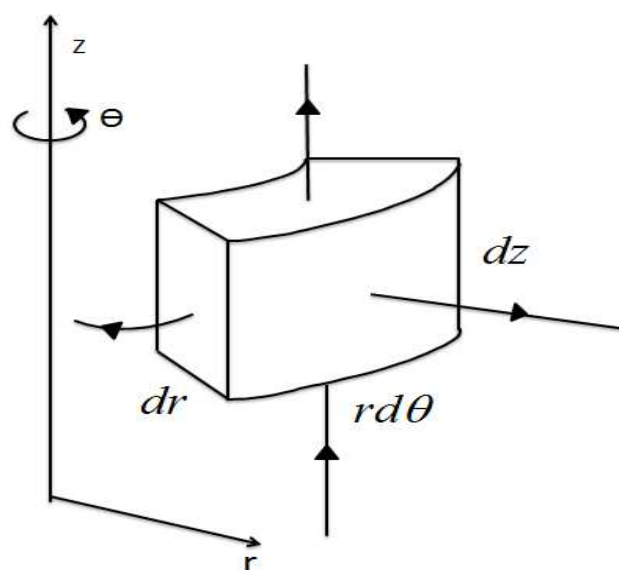
Figura 5- Sistema de secagem de grãos.



O desenvolvimento dos modelos matemáticos que descrevem este processo é fundamentado nos fenômenos de transferência de massa e calor, além de conceitos termodinâmicos, tendo como condições de contorno as condições do sistema.

Uma vez que o sistema de um secador rotativo é apresentado pela forma cilíndrica, os balanços devem ser realizados utilizando a seguinte forma estabelecida (Figura 6):

Figura 6- Representação de um elemento de volume cilíndrico.



$$\text{Áreas laterais correspondem a:} \quad \begin{cases} A_r = r\Delta\theta\Delta z \\ A_\theta = \Delta r\Delta z \\ A_z = r\Delta\theta\Delta r \end{cases} \quad (\text{Eq. 01})$$

$$\text{Volume do elemento é dado por:} \quad \Delta V = r\Delta\theta\Delta r\Delta z \quad (\text{Eq. 02})$$

Todo o desenvolvimento da modelagem do secador rotativo utilizado para secagem de grãos será realizado tomando como base este esquema em coordenadas cilíndricas.

4.4.1 BALANÇO DE MASSA

A Segunda Lei da Termodinâmica estabelece que em sistemas que possuem um gradiente de potencial, seja ele mássico, térmico ou elétrico, o fluxo acontecerá do ponto de maior potencial para o de menor até que o equilíbrio do sistema seja atingido.

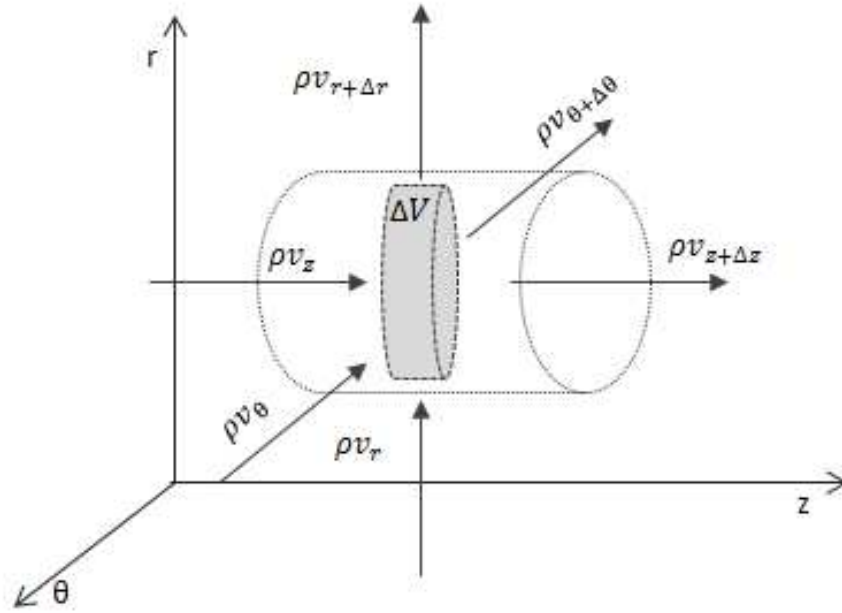
Em se tratando de um sistema de secagem, a redução de umidade do material sólido saturado na forma de moléculas de água (ou com maior concentração de moléculas de água), se dará para o meio seco até atingir o equilíbrio ou os valores especificados para o sistema.

A realização do balanço de massa do sistema deve partir da Lei de Conservação da Massa a qual afirma que a massa do sistema não pode ser perdida nem criada, havendo reação química ocorrerá à transformação do reagente em produto, porém a massa total não será modificada (Fernandes, et. al. 2006). Desta forma, a massa total presente em um processo é uma quantidade conservativa é por:

$$\{Massa \text{ de entrada}\} - \{Massa \text{ de Saída}\} + \{Geração\} - \{Consumo\} = \{Taxa \text{ de acúmulo}\}$$

Assim, utilizando a Figura 7 como representação do fluxo mássico do sistema de secagem e aplicando o balanço no elemento de controle (ΔV) teremos:

Figura 7– Esquema de fluxo mássico em um elemento de volume cilíndrico



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de concentração do} \\ \text{componente } i \\ \text{que entra no elemento de volume} \\ \text{com velocidade } v \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo concentração do} \\ \text{componente } i \\ \text{que deixa o elemento de volume} \\ \text{com velocidade } v \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo difusivo do componente } i \\ \text{que entra no elemento de volume} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo difusivo do componente } i \\ \text{que deixa o elemento de volume} \end{array} \right\}$$

$$+ \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo gerado devido} \\ \text{reações no elemento de volume} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de acúmulo do elemento } i \\ \text{com o tempo no elemento de volume} \end{array} \right\}$$

Matematicamente:

$$\frac{(\rho_i|_{t+\Delta t} - \rho_i|_t)}{\Delta t} \Delta V = -(\rho_i v_i|_{r+\Delta r} - \rho_i v_i|_r) A_r - (\rho_i v_i|_{\theta+\Delta\theta} - \rho_i v_i|_\theta) A_\theta -$$

$$(\rho_i v_i|_{z+\Delta z} - \rho_i v_i|_z) A_z = -(j_i|_{r+\Delta r} - j_i|_r) A_r - (j_i|_{\theta+\Delta\theta} - j_i|_\theta) A_\theta - (j_i|_{z+\Delta z} -$$

$$j_i|_z) A_z + (R_i) \Delta V \quad (\text{Eq. 03})$$

Onde:

i representa o elemento sólido no sistema de secagem;

ρ_i é a densidade do componente i do sistema;

j_i o fluxo mássico difusivo do componente i ;

R_i o é a taxa de reação do componente i ;

r , θ e z são as componentes do sistema cilíndrico.

Dividindo a Equação 03 pelo volume do elemento de controle ($r\Delta r\Delta\theta\Delta z$) e aplicando a limite de $\Delta r\Delta\theta\Delta z$ tendendo a zero temos:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho_i v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = \\ \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho_i v_z)}{\partial z}}_{Convectiva} + \frac{\partial(\rho_i)}{\partial t} = \\ = - \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(j_i r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial j_i}{\partial \theta} - \frac{\partial j_i}{\partial z}}_{Difusiva} + (-r_i) \end{aligned} \quad (\text{Eq. 04})$$

Sabendo que:

$$C_i = \frac{\rho_i}{PM_i} \quad \text{e} \quad J_i = \frac{j_i}{PM_i} \quad (\text{Eq. 05})$$

Então substituindo as definições da Eq.5 na Eq. 04 teremos:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_i v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = - \underbrace{\frac{1}{r} \frac{\partial(J_i r)}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial J_i}{\partial \theta} - \frac{\partial J_i}{\partial z}}_{Difusiva} + R_i \quad (\text{Eq. 06})$$

A Equação 06 mostra as contribuições convectivas e difusivas no processo de transferência de massa do sistema.

O processo de transferência de massa pode ocorrer por um mecanismo distinto ou pela combinação de mais de um. Dependendo das características do meio onde ocorre a transferência, o processo pode ser dividido em:

- Processo molecular ou difusivo;
- Processo convectivo.

O processo de transferência de massa é dito convectivo quando há o movimento de um fluido entre uma superfície ou o movimento entre dois fluidos imiscíveis. Este

tipo de transferência é função das propriedades de transporte e da dinâmica do fluido em escoamento.

Já a transferência de massa realizada de forma difusiva se caracteriza pela interação entre as moléculas no meio, daí ser também conhecida como a transferência que ocorre de forma molecular.

Este tipo de transferência possui maior predomínio durante o processo de secagem quando comparado ao processo convectivo.

A lei que descreve este fenômeno de difusão molecular foi desenvolvida por Fick, é dedutível da Teoria Cinética dos Gases e pode ser escrita de acordo com a Equação 07 mostrada a seguir:

$$J_i = -D_{ij} \frac{\partial C_i}{\partial z} \quad (\text{Eq. 07})$$

Onde:

J_i o fluxo mássico difusivo do componente i ;

D_{ij} o coeficiente de difusividade do componente i em j ;

C_i a concentração do componente i ;

z o comprimento do meio.

Tratando o fluxo de concentração entre os elementos que compõe o sistema (sólido e meio secante) ao longo do secador, podemos utilizar a relação da Lei de Difusão de Fick (Equação 07) e substituí-la na Equação 06, para obter a equação de balanço de massa em função da concentração (Equação 08).

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_i v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = D_{ij} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right] + R_i \quad (\text{Eq. 08})$$

Sabendo que o sistema de secagem é não reacional, ou seja, não há transformação dos componentes, então a Equação 08 pode ser reescrita como:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_i v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = D_{ij} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Eq. 09})$$

O modelo deduzido é comumente conhecido como Segunda Lei de Fick. Na literatura existe uma grande variedade de modelos, também desenvolvidos a partir do balanço de massa, cada qual com sua especificação de processo e material. A Tabela 2 mostra algumas relações.

Tabela 2- Modelos de equação para determinação do teor de umidade no processo de secagem.

Equação de Balanço de Massa	Referência do balanço
$\frac{\partial \rho_i}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_i v_s) = \nabla \cdot (D \cdot \nabla(\rho_i))$ <p style="text-align: right;">(Eq. 10)</p>	JOMAA E PUIGGALI, 1991
$-m_{ss} \frac{dX}{dt} = \frac{h_m \cdot A_s \cdot (P_{sup}^{vap} - P_{ar}^{vap})}{R_v \cdot T_{ar}}$ <p style="text-align: right;">(Eq. 11)</p>	YOUCEF-ALL, 2000
$\frac{\partial(C_s \cdot X)}{\partial t} = \nabla \cdot (\rho_r \cdot D \cdot \nabla X) - \nabla \cdot (C_s \cdot X \cdot U_s)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 12)</p>	AZZOUZ et.al., 2002
$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\frac{D}{(1 + \beta X)^2} \cdot \frac{\partial X}{\partial \vartheta} \right)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 13)</p>	CHEMKHI et.al. 2004
$\frac{\partial}{\partial t} (\epsilon_l \rho_l^l + \epsilon_g \rho_v^g + \epsilon_s \rho_b^s) + \nabla \cdot (\epsilon_l \rho_l^l v_l^l + \epsilon_g \rho_v^g v_g^g + \epsilon_s \rho_b^s v_b^s) = \nabla \cdot \left(\rho_v^g \cdot D \cdot \nabla \left(\frac{\rho_A^g}{\rho_g^g} \right) \right)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 14)</p>	KATEWA, 2006

Fonte: Rezende, 2011.

A escolha do modelo a ser utilizado no sistema dependerá das características do sistema e das particularidades do processo além das especificações do produto. A busca por modelos que descrevem o verdadeiro comportamento do sistema é uma tarefa presente na vida dos projetistas e engenheiros a fim de entender o funcionamento e

aproveitar o processo de maneira eficiente sem perder as características do produto acabado.

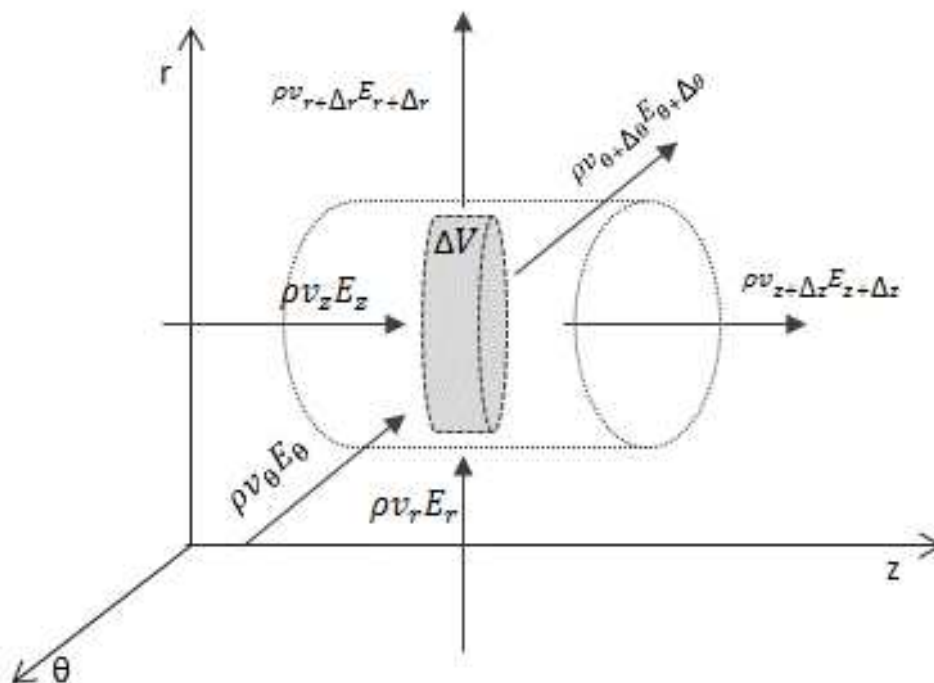
4.4.2 BALANÇO DE ENERGIA

A definição fenomenológica de transferência de calor indica que tal processo ocorre quando dois sistemas, que apresentam temperaturas diferentes, são colocados em contato térmico (BEJAN, 1996).

Na presença de um gradiente de temperatura, a transferência de energia ocorre do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura até que o equilíbrio seja atingido. Assim, os processos de transferência de calor podem ser quantificados através de equações de taxas apropriadas, onde essas equações podem ser utilizadas para calcular a energia que está sendo transferida por unidade de tempo (INCROPERA et al, 2008).

Partindo da Lei de Conservação de Energia, a determinação de um modelo para descrever o perfil energético do sistema pode ser obtido a partir da aplicação do balanço de energia no elemento de controle (ΔV) representado na Figura 8 e é representado, de forma genética, pela Equação 15.

Figura 8– Esquema do fluxo de energia em um elemento de volume cilíndrico



De forma geral teremos:

$$\begin{aligned} & \left\{ \text{Fluxo de energia do componente } i \right\} - \left\{ \text{Fluxo de energia do componente } i \right\} \\ & \left\{ \text{que entra no elemento de volume} \right\} - \left\{ \text{que deixa o elemento de volume} \right\} \\ & + \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de calor do componente } i \\ \text{que entra no} \\ \text{no elemento de volume} \end{array} \right\} - \left\{ \begin{array}{l} \text{Fluxo de calor do componente } i \\ \text{que deixa o elemento de volume} \end{array} \right\} \\ & + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de trabalho} \\ \text{realizado} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de acúmulo de energia do} \\ \text{componente } i \\ \text{com o tempo no elemento de volume} \end{array} \right\} \end{aligned}$$

Ou,

$$\sum_i \rho v_e E_e - \sum_i \rho v_s E_s + \dot{q} - \dot{w} = \frac{d(\rho E)}{dt} \quad (\text{Eq. 15})$$

Onde os sub-índices “e” e “s” representam respectivamente a entrada e saída do sistema; “E” representa a energia total do sistema composta pela energia cinética (e_c), energia potencial (e_p) e energia interna (u); “ \dot{w} ” representa o fluxo de trabalho do sistema; “ \dot{q} ” é o fluxo de calor no sistema.

O fluxo de trabalho do sistema pode ser decomposto em duas parcelas: o trabalho de pressão do fluxo para entrada e saída do sistema e o trabalho realizado no volume de controle, assim pode-se dizer que:

$$\dot{w} = \dot{w}_{vc} + (\rho P V_e - \rho P V_s) \quad (\text{Eq. 16})$$

Desdobrando a Equação 15, inicialmente para uma coordenada do sistema cilíndrico - coordenada “r”, e realizando as substituições dos itens que compõe o sistema energético teremos:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} (\rho (v_r e_{c_r} - v_{r+dr} e_{c_{r+dr}}) + \rho (e_{p_r} v_r - v_{r+dr} e_{p_{r+dr}}) + (v_r u_r - v_{r+dr} u_{r+dr})) A_r + \\ & \frac{1}{r} (\dot{q}_r - \dot{q}_{r+dr}) A_r - w_{vc} r \Delta r \Delta \theta \Delta z - \frac{1}{r} (\rho P V_r - \rho P V_{r+dr}) A_r = \\ & \frac{\partial (\rho e_c + \rho e_p + \rho u)}{\partial t} r \Delta r \Delta \theta \Delta z \end{aligned} \quad (\text{Eq.17})$$

Para a maioria das operações de secagem, o balanço de energia se reduz ao balanço de energia interna uma vez que tanto a energia cinética, potencial e outras energias podem ser negligenciadas (TSAO, et. al 1967). Logo da Equação 17 podemos dizer:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \rho ((v_r u_r - v_{r+dr} u_{r+dr})) A_r + \\ & \frac{1}{r} (\dot{q}_r - q_{r+dr}) A_r - w_{vc} r \Delta r \Delta \theta \Delta z - \frac{1}{r} (\rho P V_r - \rho P V_{r+dr}) A_r = \\ & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} r \Delta r \Delta \theta \Delta z \end{aligned} \quad (\text{Eq.18})$$

Sabendo, termodinamicamente, que a entalpia de um sistema pode ser representada pela relação entre a energia interna, a pressão e o volume do sistema de acordo com a Equação 19,

$$h = u + pV, \quad (\text{Eq.19})$$

podemos dizer em relação a Equação 18, para um sistema a volume constante, que:

$$\begin{aligned} & \frac{1}{r} \rho ((v_r h_r - v_{r+dr} h_{r+dr})) A_r + \frac{1}{r} (\dot{q}_r - q_{r+dr}) A_r - w_{vc} r \Delta r \Delta \theta \Delta z \\ & = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} r \Delta r \Delta \theta \Delta z \end{aligned} \quad (\text{Eq.20})$$

Assumindo que a velocidade dos componentes é constante ao longo do comprimento do secador, a Equação 20 pode ser dividida pelo volume de controle ($r \Delta r \Delta \theta \Delta z$) e aplicação do limite a parcela “ Δr ” tendendo a zero:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_r h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \dot{q}}{\partial r} - w_{vc} \dot{r} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \quad (\text{Eq. 21.1})$$

Desenvolvendo de fora análoga para as demais componentes do sistema cilíndrico (θ e z) obteremos:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta h)}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}}{\partial \theta} - w_{vc} \dot{\theta} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \quad (\text{Eq. 21.2})$$

$$\frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial z} - w_{vcz} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \quad (\text{Eq. 21.3})$$

Agrupando as Equações 21.1, 21.2 e 21.3 têm-se:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial r \dot{q}}{\partial r} - w_{vc_r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta h)}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}}{\partial \theta} - w_{vc_\theta} + \frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} + \frac{\partial \dot{q}}{\partial z} \\ - w_{vc_z} = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 22})$$

Reorganizando:

$$\begin{aligned} - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho r v_r h)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho v_\theta h)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho v_z h)}{\partial z} \right) - \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial r \dot{q}_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_\theta}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right) \\ - (w_{vc_r} + w_{vc_\theta} + w_{vc_z}) = \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 23})$$

Sabendo, de conceitos termodinâmicos, que a capacidade calorífica a volume constante e a pressão constante é dado por respectivamente por:

$$\left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_V = c_v,$$

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_P = c_p,$$

então da Equação 23 teremos:

$$\begin{aligned} - \rho c_p \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} v_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\theta + \frac{\partial T}{\partial z} v_z \right) - \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_\theta}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right) \\ - (w_{vc_r} + w_{vc_\theta} + w_{vc_z}) = \frac{\rho c_v \partial T}{\partial t} \end{aligned} \quad (\text{Eq. 24})$$

Sendo o componente do trabalho no volume de controle composto pelas suas coordenadas cilíndricas,

$$w_{vc_r} + w_{vc_\theta} + w_{vc_z} = \dot{w}_{vc} \quad (\text{Eq. 25})$$

Então:

$$\begin{aligned}
& -\rho c_p \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} v_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\theta + \frac{\partial T}{\partial z} v_z \right) - \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_\theta}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right) - w_{vc} \\
& = \frac{\rho c_v \partial T}{\partial t}
\end{aligned} \tag{Eq. 26}$$

De acordo com Bauman (1972) a capacidade térmica à pressão constante (C_p) é maior ou ocasionalmente igual à capacidade térmica a volume constante (C_v) uma vez que para sólidos e líquidos a diferença entre essas constantes é mínima (Equação 27):

$$c_p = c_v = c, \tag{Eq. 27}$$

Desta maneira, a Equação 26 que descreve um comportamento para o processo a pressão constante e com fluido incompressível pode ser escrita como:

$$\begin{aligned}
& -\rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} v_r + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\theta + \frac{\partial T}{\partial z} v_z \right] \\
& = - \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_r}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial \dot{q}_\theta}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial \dot{q}_z}{\partial z} \right) \right) - w_{vc}
\end{aligned} \tag{Eq. 28}$$

Para melhor entendimento do sistema, o tipo de mecanismo de transferência de temperatura deve ser analisado. A determinação do tipo de mecanismos dependerá da análise de como o processo acontece e das características do mesmo. Existem três mecanismos que descrevem este fenômeno:

- Condução
- Radiação
- Convecção

O fluxo de calor é governado pelo processo condutivo quando o transporte molecular facilita a transferência de temperatura no meio, o que quer dizer que existe contato entre as moléculas do sistema. Neste tipo de mecanismo, a Lei de Fourier descreve o processo de transferência de temperatura ao longo do comprimento do sistema.

No caso do sistema de transferência de temperatura por radiação, mecanismo mais complexo para troca de calor, a energia é emitida a partir de ondas eletromagnéticas. É importante reforçar que as ondas magnéticas não necessitam de um meio material para sua passagem.

No processo convectivo, o calor é transferido pelo movimento do ar. Neste tipo de mecanismo, está associado aos escoamentos de fluidos. Neste processo o fluido atua como agente transportador de energia que é transferida para o meio.

O processo de secagem em secadores rotativos acontece geralmente sob condições de convecção forçada. A Equação 29 é a equação utilizada em muitos casos de secagem indireta com taxa de fornecimento de calor controlado (TSAO, et. al. 1967).

No processo de secagem, aplicado a secadores rotativos, a equação que representa a transferência de calor no secador é dada por:

$$\dot{q} = U_v a \Delta T \quad (\text{Eq. 29})$$

Onde

\dot{q} é o fluxo calor transferido (kcal/min);

U_v é o coeficiente de transferência de calor (kcal/m³min °C),

V é o volume do secador (m³);

ΔT é a média logarítmica das diferenças de temperatura do ar e do produto na entrada e na saída de cada elemento secador.

O coeficiente de $U_v a$ consiste no produto de um coeficiente de transferência de calor, U_v , com base na área efetiva de contato entre o gás e o sólido, e a relação desta área para o volume do elemento secador. A utilização desse coeficiente elimina a necessidade de especificar a área específica sobre a qual ocorre a transferência de calor (Baker 1983).

Para cálculo de $U_v a$ pode-se utilizar a equação desenvolvida por Myklestad que relaciona a vazão de gás (G_A) e a área do secador de acordo com equação 30.

$$U_v a = 0.52 \left(\frac{G_A}{A} \right)^{0.8} \quad (\text{Eq. 30})$$

É importante ressaltar que a transferência de calor oriunda do processo condutivo também ocorre no sistema de secagem, porém, quando comparada ao processo convectivo, sua contribuição é pequena e poderá ser desconsiderada.

A Equação 29 pode ser substituída na Equação 28 para obtenção da equação geral do perfil de temperatura no secador (Equação 31).

$$\begin{aligned} \rho c \frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \frac{1}{r} \frac{\partial r T}{\partial r} v_r + \rho c \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\theta + \rho c \frac{\partial T}{\partial z} v_z \\ = -U_V a \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial \theta} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial z} \right) \right) - w_{vc} \end{aligned} \quad (\text{Eq.31})$$

Sendo

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \rho c \frac{1}{r} \frac{\partial r T}{\partial r} v_r + \rho c \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial \theta} v_\theta + \rho c \frac{\partial T}{\partial z} v_z = \frac{dT}{dt}$$

Teremos da Equação 31:

$$\begin{aligned} \rho c \frac{dT}{dt} = -U_V a \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial \theta} \right) \right. \\ \left. + \left(\frac{\partial (T - T_\infty)}{\partial z} \right) \right) - w_{vc} \end{aligned} \quad (\text{Eq.32})$$

Reorganizando a Equação 32 teremos:

$$-\nabla(U_V a \Delta T) - w_{vc} = \rho c \frac{dT}{dt} \quad (\text{Eq 32.1})$$

De forma análoga aos modelos obtidos para perfil de comportamento de transferência de massa encontrados na literatura, diversos modelos estão disponibilizados, com base na abordagem clássica de análise, para determinar o fluxo de energia no sistema de secagem. A Tabela 3 mostra alguns modelos desenvolvidos a partir da aplicação de balanços de energia que podem ser aplicados para determinação do perfil de temperatura ao longo de processos de secagem.

Tabela 3 -Modelos de equação para determinação do perfil de temperatura ao longo do secador.

Balanco de energia	Referência
$(\rho_r c_{p,s} \delta) \frac{\partial T_s}{\partial t} = h_c (T_{ar} - T_s^{sup}) - m_{sup} \lambda_s$ <p style="text-align: right;">(Eq. 32)</p>	KECHAOU,1990
$\langle \rho_r c_{p,s} \rangle \frac{\partial \langle T_s \rangle}{\partial t} + (\langle \rho_r c_{p,s} \rangle \cdot \langle v_s \rangle - c_{p,a} h_m \nabla p_l) \nabla \langle T_s \rangle = \nabla \cdot (K_s \nabla T_s)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 33)</p>	JOMAA e PUIGGALL, 1991
$\frac{\partial (\rho_b h_s)}{\partial t} = h_c (T_{ar} - T_s^{sup}) \lambda_s h_m (UR - aw_g)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 34)</p>	KIRANOUDIS et. al. 1995
$\rho_r c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial \varepsilon} \left(\frac{K_s}{1 + \beta X} \frac{\partial T_s}{\partial \varepsilon} \right)$ <p style="text-align: right;">(Eq. 35)</p>	CHEMKHI et. al. 2005
$\rho_r c_{p,s} \left(\frac{\partial T_s}{\partial t} \right) = \nabla (K_s \nabla T_s)$ <p style="text-align: right;">(Eq.36)</p>	CURCIO, 2008

Fonte: Rezende, 2011.

A escolha de qual modelo utilizar no processo em análise irá depender das especificações e considerações do sistema.

4.4.3 BALANÇO DE ENTROPIA

O balanço de entropia para um sistema termodinâmico é uma informação adicional para a resolução de problemas, especialmente os que tratam da espontaneidade de um processo ou da conversão de calor em trabalho e vice-versa (FERNANDES, et. al. 2006).

A entropia é uma propriedade extensiva e, portanto, a entropia total de um sistema é igual a soma das entropias das partes de um sistema. Como nenhum processo real é verdadeiramente reversível, pode-se afirmar que a alguma entropia é gerada durante um processo, logo a entropia do universo está aumentando continuamente. Isto

é, quanto maior irreversível for o processo, maior será a entropia gerada durante o processo (ÇENGEL, 2012).

O princípio do aumento de entropia não significa que a entropia de um sistema não possa diminuir. Na verdade, a variação de entropia de um sistema pode ser negativa durante o processo, porém a geração de entropia não pode. O princípio da entropia pode ser entendido como sendo:

$$S_G = \dot{\sigma} \begin{cases} > 0 & \text{processo irreversível} \\ = 0 & \text{processo reversível} \\ < 0 & \text{processo impossível} \end{cases} \quad (\text{Eq. 37})$$

Irreversibilidade do sistema como atrito, reações químicas, transferência de calor com uma diferença de temperatura finita, expansão não resistida, compressão ou expansão em não equilíbrio, são responsáveis pelo aumento contínuo da entropia do sistema. O termo de geração de entropia ($\dot{\sigma}$) é adicionado nas análises de balanço entrópico como forma de medida de entropia criada por tais efeitos durante um processo.

Em geral, os processos reais são irreversíveis e apresentam sempre geração de entropia, ou seja, " $\dot{\sigma} > 0$ ". Uma classe especial de processos termodinâmicos é a dos processos reversíveis que ocorrem de tal modo que, a cada instante, os gradientes presentes no sistema são infinitesimais. Assim, esses processos podem ser reversíveis se as transferências de massa, calor e trabalho forem reversíveis, podendo o sistema retornar ao seu estado inicial. Nesse caso, a taxa de geração de entropia é nula ($\dot{\sigma} = 0$). É interessante abordar os processos industriais como sendo reversíveis, pois podemos obter um valor aproximado para a mudança da entropia. (FERNANDES, et. al. 2006).

Com base na Entropia, pode-se concluir que:

- Processos podem ocorrer em determinada direção e não em qualquer direção. Um processo que viola este princípio é dito impossível.
- A entropia é uma propriedade que não se conserva e não existe um processo de conservação de entropia. A entropia é conservada em apenas durante processos reversíveis idealizados e aumenta durante todos os processos reais.

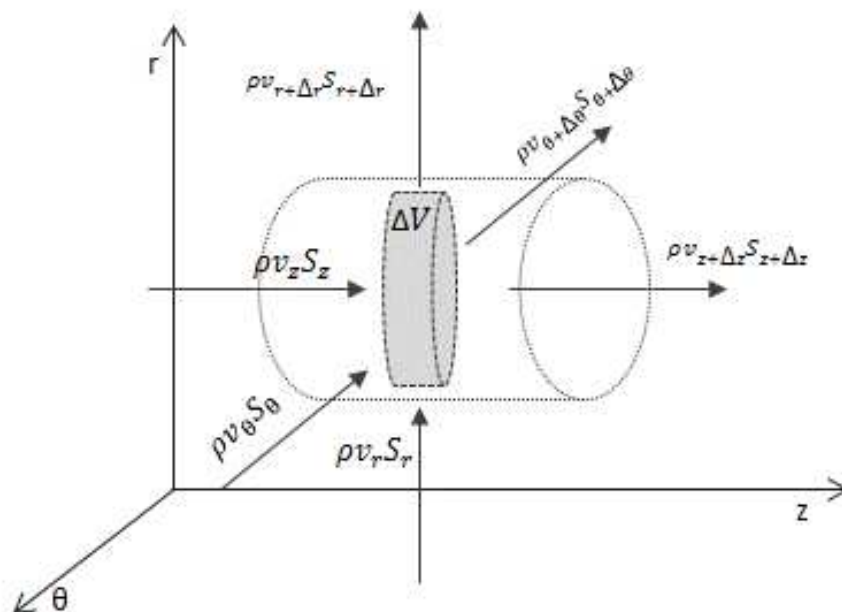
- A geração de entropia é uma medida das magnitudes das irreversibilidades presentes durante o processo, quanto mais severas forem às irreversibilidades do processo maior será a geração de entropia.

A entropia de um sistema é uma variável de estado e sua variação ocorre devido à:

- À transferência de calor através das fronteiras do sistema, à taxa de $\left(\frac{\dot{Q}}{T}\right)$, sendo T a temperatura absoluta no ponto da transferência de calor \dot{Q} ;
- Ao escoamento de massa para dentro ou para fora do sistema, carregando entropia;
- À taxa de geração interna de entropia.

Segundo Van Ness (2007), da mesma forma que um balanço de energia pode ser escrito para processos nos quais há entrada, saída ou escoamento de fluido através de um volume de controle, também pode ser escrito um balanço de entropia. Assim, aplicando o balanço entrópico no volume de controle ΔV demonstrado na Figura 9, teremos de forma geral a Equação 38:

Figura 9– Esquema do fluxo de entropia em um elemento de volume cilíndrico



$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa líquida de variação} \\ \text{na entropia das correntes} \\ \text{escoando} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa dinâmica de variação de} \\ \text{entropia no} \\ \text{volume de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de variação de} \\ \text{entropia na vizinhança} \end{array} \right\} \\ = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa total de} \\ \text{geração de entropia} \end{array} \right\}$$

Ou,

$$\rho \frac{dS}{dt} = \sum \rho_e v_e s_e - \sum \rho_s v_s s_s + (\dot{S}) \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.38})$$

Onde

$\rho_e v_e s_e$ - Representa o fluxo de entrada do sistema com entropia de entrada (s_e) do elemento em análise;

$\rho_s v_s s_s$ - Representa o fluxo de saída do elemento de controle com entropia de saída (s_s);

\dot{S} - Representa a variação de entropia no sólido, ou o processo difusivo de entropia da mistura;

$\frac{\dot{Q}}{T}$ - O calor adicionado ou retirado ou a contribuição da vizinhança;

σ - A taxa de geração de entropia no elemento de controle.

Aplicando inicialmente o balanço apenas na coordenada “ r ” do sistema cilíndrico, obtemos:

$$\rho_i \frac{\partial S}{\partial t} r \Delta r \Delta \theta \Delta z = \frac{1}{r} (\rho_r v_r s_r - \rho_{r+dr} v_{r+dr} s_{r+dr}) r \Delta \theta \Delta z \\ + \frac{1}{r} ((\dot{S})_r - (\dot{S})_{r+dr}) r \Delta \theta \Delta z \pm \frac{1}{r} \frac{\dot{Q}_r}{T} r \Delta r \Delta \theta \Delta z + \sigma r \Delta r \Delta \theta \Delta z \quad (\text{Eq.39})$$

Dividindo pelo a Equação 39 pelo elemento de volume $r \Delta r \Delta \theta \Delta z$ e aplicando o limite para $\Delta r \Delta \theta \Delta z$ tendendo a zero teremos:

$$\rho_i \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{S}}{\partial r} \pm \frac{1}{r} \frac{\dot{Q}_r}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.40})$$

Realizando de forma análoga para demais coordenadas e agrupando as Equações 40, 40.1 e 40.2 teremos:

$$\rho_i \frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{1}{r} \frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial \theta} + \frac{1}{r} \frac{\partial \dot{S}}{\partial \theta} \pm \frac{1}{r} \frac{\dot{Q}_\theta}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.40.1})$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} = -\frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial z} + \frac{\partial \dot{S}}{\partial z} \pm \frac{\dot{Q}_z}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.40.2})$$

Agrupando as coordenadas do sistema cilíndrico e organizando as equações tem-se:

$$\begin{aligned} \rho_i \frac{\partial S}{\partial t} = & -\left(\frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_i s_i)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho_i v_i s_i)}{\partial \theta} + \frac{\partial(\rho_i v_i s_i)}{\partial z} \right) \\ & - \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(\dot{S})}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\dot{S})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\dot{S})}{\partial z} \right) \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \end{aligned} \quad (\text{Eq.41})$$

Rearranjando,

$$\rho_i \frac{\partial S}{\partial t} = -\left(\frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial r} + \frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial \theta} + \frac{\partial \rho_i v_i s_i}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial(\dot{S})}{\partial r} + \frac{\partial(\dot{S})}{\partial \theta} + \frac{\partial(\dot{S})}{\partial z} \right) \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.42})$$

A Equação 42 representa o balanço de entropia para o sistema com a primeira parcela representando a parte convectiva de entropia, a segunda representa a contribuição difusiva de entropia, a terceira parcela a contribuição do sistema e por fim a geração de entropia. Esta equação pode ser escrita na forma de derivada substancial como:

$$\rho_i \frac{dS}{dt} = -\nabla \dot{S} \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.43})$$

A partir do conceito de entropia da mistura, a mesma pode ser analisada como a entropia que ocorre no interior do sólido, ou seja, em sua forma molecular. Nesse caso, é possível considerar que a entropia da mistura é conduzida com maior proporcionalidade pela transferência de calor que ocorre naquele meio, podemos dizer que:

$$\partial \dot{S} = \frac{\partial \dot{q}}{T} \quad (\text{Eq.44})$$

Logo, temos da Equação 44:

$$\rho_i \frac{dS}{dt} = -\nabla \left(\frac{\dot{q}}{T} \right) \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.45})$$

Desenvolvendo matematicamente o termo $\nabla \left(\frac{\dot{q}}{T} \right)$ teremos:

$$\nabla \left(\frac{\dot{q}}{T} \right) = \nabla \frac{\dot{q}}{T} + q \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \quad (\text{Eq.46})$$

Uma vez que as análises podem ser realizadas do ponto de vista molecular, a Lei de Fourier de condução de temperatura pode ser utilizada para análises do fluxo difusivo de entropia.

A equação que descreve o comportamento da transferência de calor através do processo condutivo é representada pela Equação 47.

$$\dot{q} = -k \nabla T \quad (\text{Eq.47})$$

Onde:

“q” representa o fluxo de calor;

k é a condutividade térmica do material (W/m.K);

∇T é o gradiente de temperatura nas coordenadas em um sistema cilíndrico.

Logo, substituindo a Equação 47 na equação da entropia (Equação 45) obtém-se a expressão que descreve a contribuição difusiva da entropia na mistura.

$$\rho_i \frac{dS}{dt} = -\nabla \frac{\dot{q}}{T} - q \nabla \left(\frac{1}{T} \right) \pm \frac{\dot{Q}}{T} + \sigma \quad (\text{Eq.48})$$

$$\rho_i \frac{dS}{dt} = -\nabla \frac{\dot{q}}{T^2} - q \nabla \left(\frac{1}{T^2} \right) \pm \frac{\dot{Q}}{T^2} + \sigma/T \quad (\text{Eq.49})$$

Rearranjando a Equação 49 teremos:

$$\rho_i \frac{dS}{dt} = + \frac{k}{T^2} \nabla^2 T \pm \frac{\dot{Q}}{T^2} + \sigma/T \quad (\text{Eq.50})$$

A Equação 50 representa o Balanço Entrópico para com as contribuições convectivas, difusiva e com a geração de entropia de um sistema.

Rearranjando a Equação 50 teremos a Equação 51 para determinar a taxa de geração de entropia de um sistema, analisando para um sistema estacionário:

$$\sigma = -\frac{k}{T} \nabla^2 T \pm \frac{\dot{Q}}{T} \quad (\text{Eq.51})$$

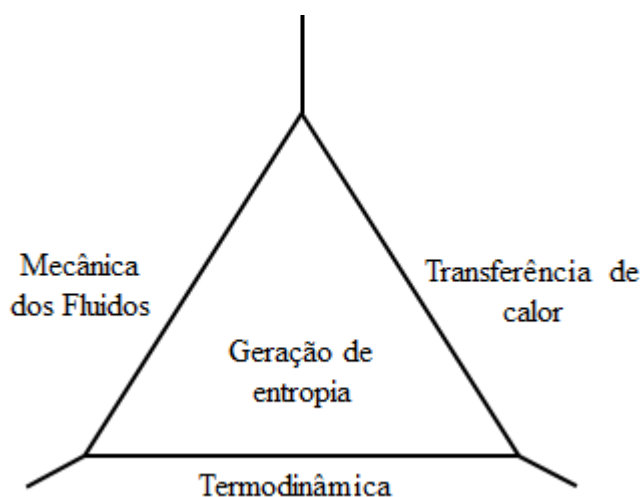
A Equação 51 representa a equação para determinação da taxa de geração de entropia em função do perfil de temperatura do sistema, uma vez que as contribuições do balanço mássico e de movimento foram consideradas irrisórias quando comparados ao balanço energético.

4.4.4 OTIMIZAÇÃO: MINIMIZAÇÃO ENTRÓPICA

A minimização da taxa de geração de entropia também conhecida como MGE é um método de otimização de processos que vem sendo bastante utilizado nas últimas décadas devido os bons resultados encontrados quanto a avaliação de processos térmicos.

Segundo Bejan (1996), o método de MGE é uma forma interdisciplinar que combina princípios básicos da termodinâmica, transferência de calor e mecânica dos fluidos, e apresenta uma combinação promissora de interesses da engenharia e estudos físicos. A Figura10 mostra uma relação entre a minimização de entropia e outras áreas da ciência.

Figura 10- Interdisciplinaridade do processo de MGE



Fonte: Bejan, 2002.

O método da minimização entrópica está baseado na equação de Gouy-Stodola que relaciona sistemas ideais e reais descrita (Bejan, 2002) na Equação 52.

$$W_{real} - W_{ideal} = T_0 \dot{\sigma} \quad (\text{Eq.52})$$

Onde

W_{ideal} representa a taxa de trabalho em um processo ideal;

W_{real} a taxa de trabalho em um processo real;

T_0 a temperatura da vizinhança;

$\dot{\sigma}$ a taxa de geração de entropia do processo.

Nas análises de sistemas baseados nesta equação, quando a geração de entropia é nula, a taxa de trabalho do processo real será igual ao trabalho de um ideal e o processo pode ser caracterizado como reversível.

No processo de otimização, de maneira geral, deseja-se minimizar ou maximizar variáveis para tornar os processos com maior rendimento e menor custo.

Os problemas de otimização são desenvolvidos a partir do seguinte problema:

$$\begin{aligned} & \textit{minimizar } f(x) \\ & \textit{sujeito a } x \in U \end{aligned}$$

onde $f: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ é uma função arbitrária e $U \subset \mathbb{R}^n$ é um conjunto qualquer.

No caso da minimização entrópica, a otimização do processo é desenvolvida com a minimização da taxa de geração de entropia sujeito a restrições, caso exista no processo. A entropia por ser função da temperatura, pressão e número de moles de um componente no sistema pode apresentar restrições a partir destas variáveis.

Além da otimização das variáveis de projeto, a minimização da taxa de geração de entropia pode ser utilizada para determinar uma forma mais eficiente de se realizar o controle de um processo. Uma possibilidade seria o uso da quantidade total de energia empregada/disponível no processo como parâmetro de eficiência de acordo com a 1ª Lei da termodinâmica.

No entanto essa abordagem não considera a irreversibilidade do processo, ou seja, a qualidade com que tal energia é empregada, de modo que conceitos derivados da 2ª Lei, tais como exergia e taxa de geração tem sido utilizado para aumentar a eficiência termodinâmica através da Teoria do Controle Ótimo. (PAIM, 2013)

Para a determinação das condições de operação, as análises dos sistemas operacionais são realizadas no regime estacionário, onde analisando de forma infinitesimal, podemos caracterizar um sistema reversível naquele momento, assegurando a condição de mínima geração de entropia ou geração de entropia nula.

Assim, partindo do balanço de entropia desenvolvido no Item 4.4.3, a taxa de geração de entropia dada pela Equação 51 deve ser minimizada a fim de obtenção de novas informações sobre o processo de secagem avaliado em condições de reversibilidade.

5.0 METODOLOGIA

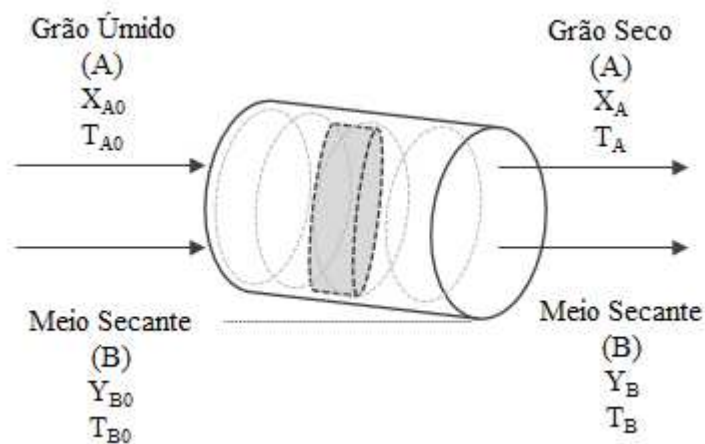
A metodologia a ser utilizada e desenvolvida no trabalho em questão é baseada nas análises dos balanços de massa, energia e entropia além de conceitos termodinâmicos do processo de secagem. Será utilizado também o conceito de minimização da taxa de geração de entropia com o intuito avaliar o sistema operando à estas condições.

5.1 SISTEMA DE SECAGEM DE GRÃOS

O processo de secagem de grãos é realizado para reduzir o teor de umidade evitando assim que microrganismos se desenvolvam prejudicando a qualidade e o tempo de vida útil do grão.

A Figura 11 será utilizada como esquema para desenvolvimento do modelo matemático do sistema de secagem de grãos utilizando o secador rotativo, em que A irá representar o sólido (grão de milho) e B representará o meio secante do sistema.

Figura 11– Sistema de secagem de grãos.



O desenvolvimento dos perfis de redução de umidade e comportamento da temperatura ao longo do processo de secagem é uma ferramenta de controle e correção do sistema utilizada de forma ampla para acompanhamento do processo e tomadas de decisões.

Para tanto, os modelos matemáticos que descrevem os perfis desenvolvidos nos Itens 4.4.1, 4.4.2 e 4.4.3 de massa, temperatura e entropia respectivamente, serão utilizados para desenvolvimento de análise deste processo.

Usualmente, é comum a utilização da análise dos processos de transferência clássicos, massa e temperatura, nos sistemas de secagem. A introdução do balanço entrópico contribuirá, com conceitos termodinâmicos, para avaliar o sistema sob a condição de mínima geração de entropia.

A seguir teremos os modelos que serão utilizados para determinação dos perfis de umidade, temperatura e entropia do sistema de secagem de grãos.

5.2 BALANÇO DE MASSA- DESENVOLVIMENTO

Tomando como base o balanço de massa geral desenvolvido no Item 4.4.1 e utilizando a Figura 11 como esquema para representar o secador rotativo, teremos:

a) Balanço de Massa para o sólido- grão (A).

Partindo do balanço geral (Equação 09) temos para o sólido:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_i v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_i v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_i)}{\partial t} = D_{ij} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_i}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 C_i}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 C_i}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Eq.09})$$

Aplicando para o sólido A:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_A v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_A v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_A v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_A)}{\partial t} = D_{AB} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_A}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 C_A}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 C_A}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Eq.09.1})$$

b) Balanço de Massa para o meio secante (B).

Tomando o mesmo direcionamento que foi realizado com o sólido, podemos dizer que o balanço mássico para o meio secante é dado por:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(C_B v_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(C_B v_\theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial(C_B v_z)}{\partial z} + \frac{\partial(C_B)}{\partial t} = D_{BA} \left[\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial C_B}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \left(\frac{\partial^2 C_B}{\partial \theta^2} \right) + \frac{\partial^2 C_B}{\partial z^2} \right] \quad (\text{Eq.09.2})$$

5.3 BALANÇO DE ENERGIA- DESENVOLVIMENTO

Partindo da metodologia utilizada no Item 4.4.2 para realização do Balanço de Energia no processo de secagem de grãos, tomando como equação geral a Equação 32, teremos:

$$\rho c \frac{dT}{dt} = -U_v a \left(\left(\frac{1}{r} \frac{\partial(T - T_\infty)}{\partial r} \right) + \left(\frac{1}{r} \frac{\partial(T - T_\infty)}{\partial \theta} \right) + \left(\frac{\partial(T - T_\infty)}{\partial z} \right) \right) - w_{vc} \quad (\text{Eq.32})$$

a) Balanço de Energia para o sólido- grão (A).

A Equação 32.2 mostra o balanço de energia para o sólido A. A equação foi obtida a partir do balanço geral demonstrado na Equação 32.

$$\frac{dT_A}{dt} = -\frac{U_v a}{\rho c} ((T_A - T_\infty)_r + (T_A - T_\infty)_\theta + (T_A - T_\infty)_z) - w_{vc} \quad (\text{Eq.32.2})$$

b) Balanço de Energia para o meio secante (B).

De forma análoga ao procedimento realizado para o sólido, a Equação 32.3 mostra o balanço de energia para o meio secante utilizado no processo de secagem.

$$\frac{dT_B}{dt} = -\frac{U_v a}{\rho c} ((T_B - T_\infty)_r + (T_B - T_\infty)_\theta + (T_B - T_\infty)_z) - w_{vc} \quad (\text{Eq.32.3})$$

5.4 BALANÇO DE ENTROPIA- DESENVOLVIMENTO

Com base na metodologia apresentada no Item 4.4.3, a variação de entropia do processo é dada pela equação abaixo (Eq.51).

$$\frac{dS}{dt} = \frac{k}{T^2} \nabla^2 T \pm \frac{\dot{Q}}{T^2} + \sigma/T \quad (\text{Eq.50})$$

Já a taxa de geração de entropia do sistema é dada pela Equação 51 desenvolvida no Item 4.4.3.

$$\sigma = -\frac{k}{T} \nabla^2 T \pm \frac{\dot{Q}}{T} \quad (\text{Eq.51})$$

6.0 MODELAGEM DO PROCESSO

Com o modelo matemático desenvolvido para a secagem de grãos utilizando secadores rotativos, obtidos a partir dos balanços de massa, energia e entropia, podemos utilizá-los para determinar o comportamento do processo de secagem ao longo do secador.

Visto que o processo de secagem é complexo, algumas considerações sobre o sistema podem ser realizadas sem comprometer o entendimento do mesmo. As considerações a seguir foram assumidas:

- Sistema operando no estado estacionário, pois a mínima taxa de produção de entropia dirige o sistema para um estado reversível, que está associado no estado estacionário;
- Sistema adiabático;
- Velocidade constante ao longo do secador;
- Secador operando com fluxos paralelos entre o material e o meio secante;
- Propriedades como difusividade e coeficiente de transferência de calor consideradas constante ao longo do secador;
- Fluxos considerados ao longo do comprimento do secador, ou seja, fluxos no sentido radial e angular foram negligenciados;
- Propriedades físicas e pressão constante;
- O trabalho realizado pela rotação apenas confere um sistema homogêneo.
- Predomínio do processo difusivo para transferência de massa e convectivo no processo de transferência de calor na secagem.
- Assumindo apenas a contribuição do balanço de energia no balanço entrópico.

Aplicando as considerações realizadas sobre o sistema no conjunto de equações mostradas nos Item 5.2, 5.3 e 5.4 teremos:

➤ *Balanço de Massa para o sólido (grão)*

$$D_{AB} \left[\frac{d^2 C_A}{dz^2} \right] = 0 \quad (\text{Eq.53})$$

➤ *Balanço de Massa para o meio secante*

$$D_{BA} \left[\frac{d^2 C_B}{dz^2} \right] = 0 \quad (\text{Eq.54})$$

➤ *Balanço de Energia para o sólido (grão)*

$$\frac{U_V a}{\rho c} ((T_A - T_\infty)_z) = 0 \quad (\text{Eq.55})$$

➤ *Balanço de Energia para o meio secante*

$$\frac{U_V a}{\rho c} ((T_B - T_\infty)_z) = 0 \quad (\text{Eq.56})$$

➤ *Balanço de Entropia*

$$\frac{k}{T} \nabla^2 T + \sigma = 0 \quad (\text{Eq.57})$$

7.0 SIMULAÇÃO

Como um instrumento fundamental para a análise de processos, a simulação tem contribuído para a análise do comportamento de sistemas nos estados estacionários e dinâmicos, bem como na definição de estratégias para aumentar e otimizar o rendimento do processo com custo reduzido.

As condições de operação e especificações variam de acordo com o sistema. No caso da secagem de grãos, variáveis como temperatura de secagem, umidade final do produto e do meio secante, tempo de secagem e velocidade de operação do sistema, são itens monitorados e avaliados constantemente uma vez que podem alterar as características do produto final.

Altas temperaturas de secagem tornam o grão de milho mais quebradiço o que o torna com menor valor comercial. Temperaturas baixas ocasionam um produto fora de especificação, de acordo com a legislação e com maior susceptível ao desenvolvimento de microrganismos deterioradores.

A Tabela 4 mostra algumas informações sobre o processo de secagem de grãos de milho, que serão utilizados para as análises em questão.

Tabela 4- Parâmetros de processo de secagem de grãos

<i>Dados de entrada do sistema</i>	
Umidade inicial do grão (% b.u)	20
Temperatura de entrada do grão (°C)	25
Temperatura de entrada do meio secante (°C)	80 – 100
Fluxo de entrada do grão (kg/s)	1250
<i>Dados de saída do sistema</i>	
Umidade final do grão (% b.u)	12,5
Temperatura de saída do grão (°C)	54
Temperatura de secagem (°C)	74

Fonte: Costa et. al., 2010.

A literatura mostra que o grão suporta temperatura na faixa de 74°C no processo de secagem, se tornando assim uma restrição para esta operação.

O processo de minimização da taxa de entropia deve ser conduzido sob a restrição de temperatura do processo, e as demais características podem ser avaliadas de acordo com o seguinte controle:

$$\text{Minimizar } \sigma = f(T_{\text{secagem}})$$

Com restrição de temperatura: $T < 74^{\circ}\text{C}$

O desenvolvimento das equações foi realizado a partir de conceitos de equações diferenciais lineares, utilizando os programas Excel® como também o ambiente MatLab®.

Dentre as funções de minimização presentes na ferramenta computacional, será utilizado o comando *fminbnd*, utilizado para determinado os mínimos de uma função de uma variável dentro de um intervalo.

As equações que descrevem os perfis de umidade e temperatura também podem ser analisadas de forma analítica e desenvolvidas em forma de equações diferenciais ordinárias.

8.0 RESULTADOS E DISCURSÕES

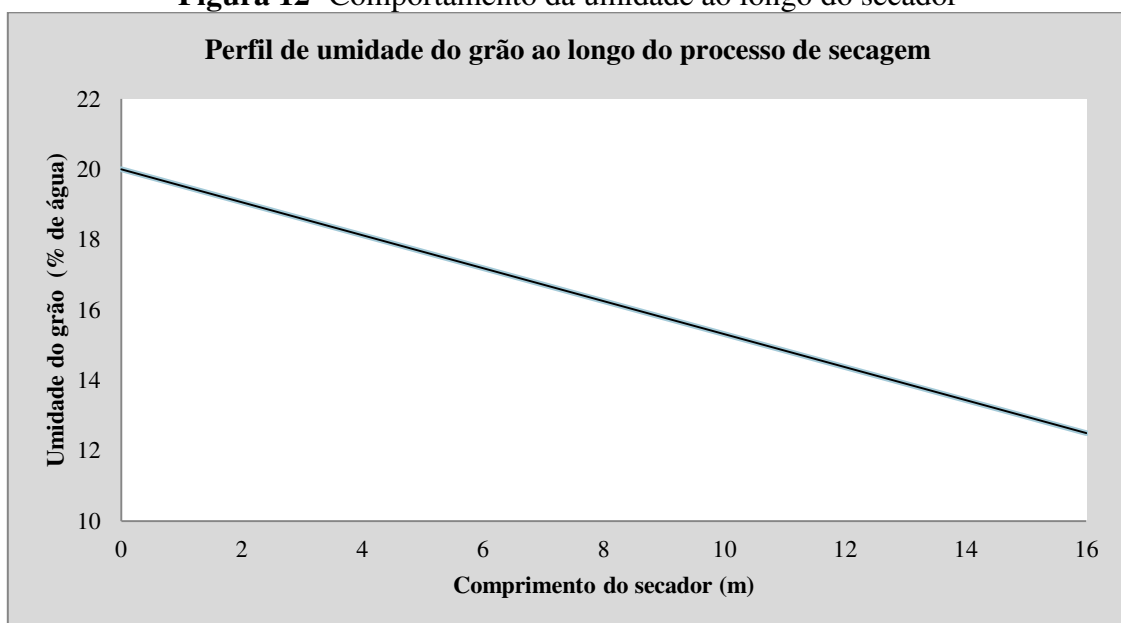
O perfil de redução de umidade ao longo do secador pode ser utilizado como um indicador de eficiência do processo em uma planta industrial. A partir deste comportamento pode-se identificar qualquer tipo de variação nos parâmetros de operação além de falhas do processo que venham a torna-la inviável. Conhecendo este comportamento, tratativas podem ser tomadas ao longo do processo de secagem visando a retirada de umidade do grão sem perda de produtividade e consequentemente com menor custo.

O perfil de redução de umidade do milho grão ao longo do comprimento do secador, considerando o sistema em estado estacionário, foi avaliado e a Figura 12 mostra o comportamento obtido. O perfil foi desenvolvido a partir das condições do sistema aplicadas à Equação 53, aplicando as condições de contorno, temperaturas inicial e final para o comprimento do secador (Eq. 53.1):

$$D_{AB} \left[\frac{d^2 C_A}{dz^2} \right] = 0 \quad (\text{Eq.53})$$

$$X_A(z) = D_{AB} (X_{Af} - X_{A0}) \left(\frac{z}{L} \right) + X_{A0} \quad (\text{Eq.53.1})$$

Figura 12- Comportamento da umidade ao longo do secador



Com umidade inicial na faixa de 20,0% e com especificação de umidade final de 12,5%, o gráfico (Figura 12) mostra a redução acentuada de umidade ao longo do comprimento do secador. O predomínio das forças difusivas, após o período de umidade crítica, resulta da reta descendente mostrada na figura. O percentual de umidade final é de extrema importância tanto por ser especificada pelos órgãos fiscalizadores, ANVISA e MAPA- Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, como por ser um indicativo de performance do sistema.

Para o meio secante utilizado no sistema, à medida que o processo avança, as trocas de massa vão acontecendo e o processo reverso que ocorre no grão acontece com o meio secante, a diferença de pressão do meio faz com que o mesmo condense, daí a existência de purgadores nas linhas de secagem.

Além do perfil de umidade, o perfil de temperatura também é amplamente utilizado para análise do sistema de secagem, pois a variável temperatura deve ser controlada tornando assim o processo viável. Assim, as Figuras 13a e 13b representam o perfil de temperatura do sólido (Equações 55/56) ao sistema. A Figura 13a mostra o período de aquecimento do grão, partindo da temperatura inicial até sua temperatura de secagem, ou seja, período até o sexto/sétimo segmento do secador, onde o mesmo atinge a temperatura de secagem do grão. Já a Figura 13-b mostra o período de resfriamento do grão até atingimento de sua temperatura de saída do processo.

$$\frac{U_V a}{\rho c} ((T_A - T_\infty)_z) = 0 \quad (\text{Eq.55})$$

$$\frac{U_V a}{\rho c} ((T_B - T_\infty)_z) = 0 \quad (\text{Eq.56})$$

A temperatura de secagem é específica para cada grão, no caso do milho a temperatura é na faixa de 74°C, acima desta temperatura o mesmo inicia sua perda de umidade de água de composição do grão, o que não é interessante por tornar o produto frágil, daí a importância do controle da temperatura do processo.

Figura 13a - Perfil de temperatura do grão ao longo do processo de aquecimento.

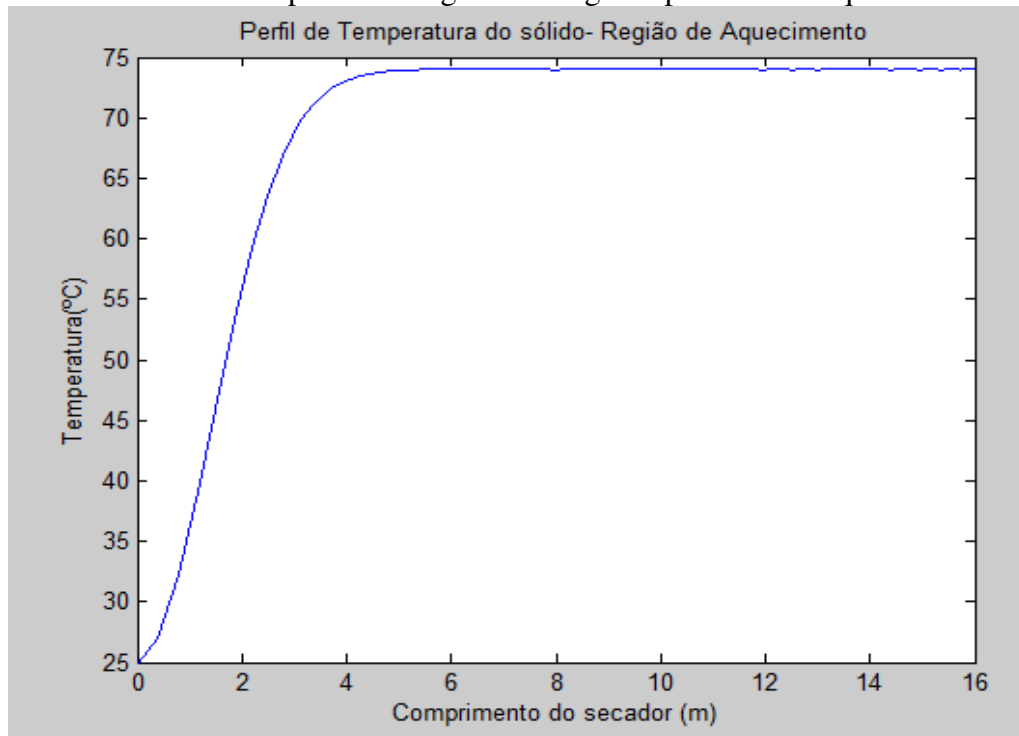
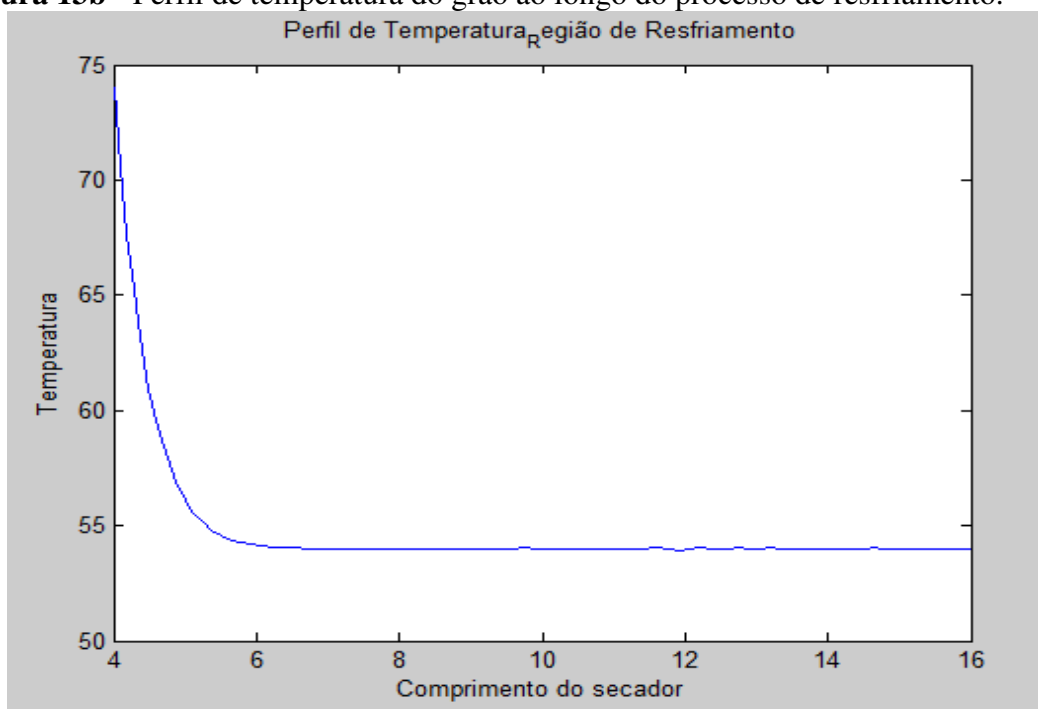


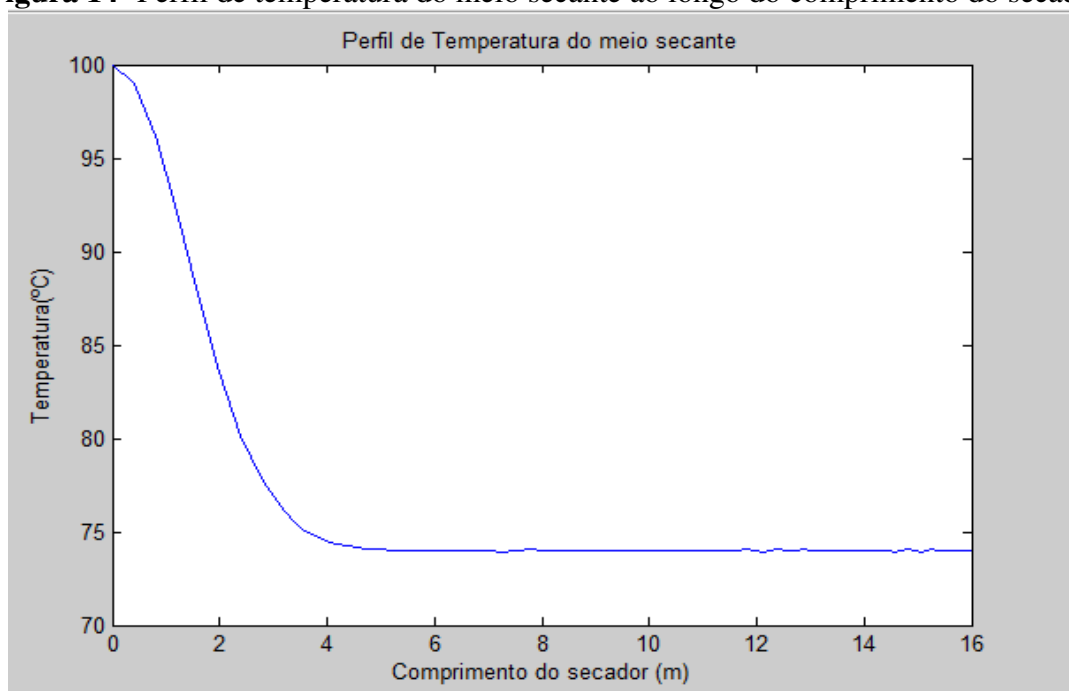
Figura 13b - Perfil de temperatura do grão ao longo do processo de resfriamento.



No momento do resfriamento (Fig. 13b) o processo de secagem ainda acontece, porém com menor intensidade a fim de controlar tanto a temperatura final e consequentemente a umidade do grão.

Com relação ao meio secante, a Figura 14 mostra seu perfil de temperatura ao longo do processo caracterizada por uma curva descendente até o equilíbrio do meio. Esta redução de temperatura, em sistemas normais, é controlada com a adição contínua de calor no sistema, para que a operação não tenha seu desempenho comprometido, ou seja, para que o fluxo de secagem não apresente oscilações significativas de redução de diferencial de temperatura e pressão entre o meio secante e o produto a ser seco.

Figura 14- Perfil de temperatura do meio secante ao longo do comprimento do secador



É interessante observar que nas linhas de vapor do processo de secagem é frequente o uso de purgadores que têm como objetivo a retirada da condensação do sistema ajudando a manter a temperatura do meio secante.

Os perfis apresentados, umidade e temperatura, são os perfis geralmente utilizados nos processos como um todo, inclusive no processo de secagem de grãos. Os balanços de massa e temperatura são métodos usualmente utilizados na projeção e ajustes de parâmetros como comprimento do secador e quantidade de calor que deve ser adicionado ao sistema.

Para obtenção de maiores informações do sistema, o balanço entrópico é utilizado para determinar o perfil da taxa de geração de entropia do grão ao longo sistema. A Figura 15 representa o comportamento da taxa de geração de entropia do grão. O perfil foi determinado a partir da Equação 57.

$$\dot{\sigma} = -\frac{k}{T} \nabla^2 T \quad (\text{Eq. 57})$$

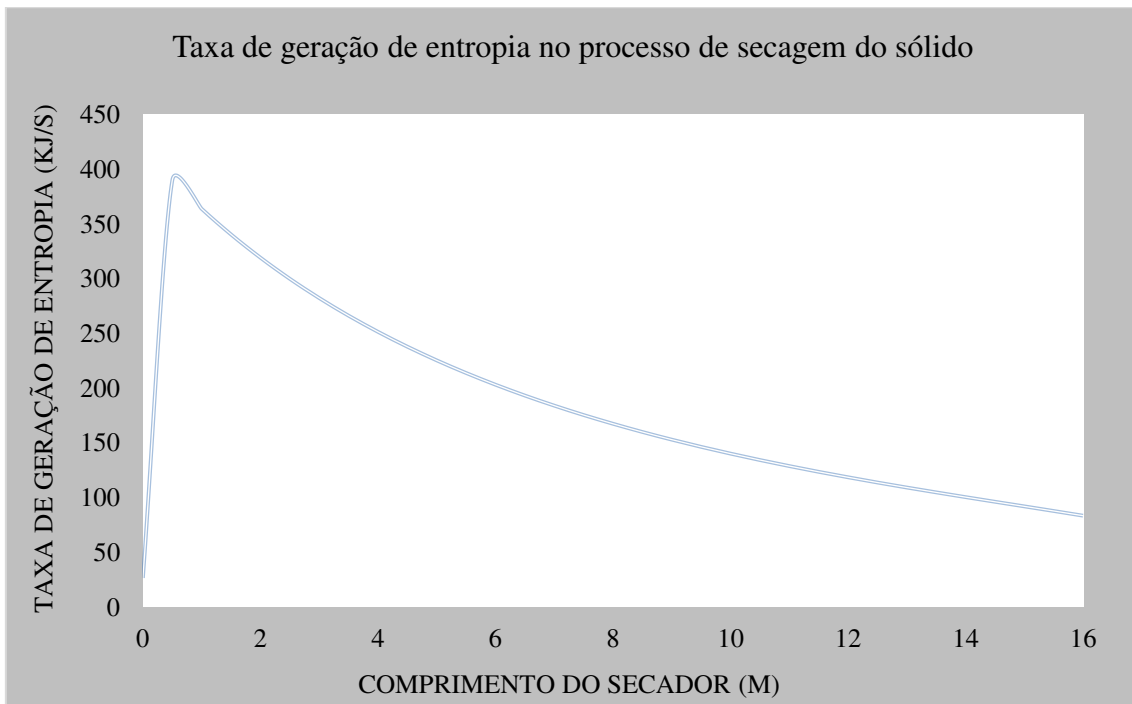
A taxa de geração de entropia, de acordo com equação 51 é desenvolvida em função da temperatura do sistema, que evolui à medida que o processo de secagem ocorre. A equação pode ser desenvolvida como EDO de 2º ordem com as condições iniciais do processo.

$$\sigma = \frac{c_1 + c_2 e^{rz}}{\left(\frac{T^2}{2\rho V h} + \frac{T}{\rho^2 V^2 h^2} \right)}$$

Onde,

$$c_1 = T_0 - \frac{(T_l - T_0)}{(e^{Ml} - 1)} \quad c_2 = \frac{(T_l - T_0)}{(e^{Ml} - 1)}$$

Figura 15- Perfil da taxa de geração de entropia ao longo do comprimento do secador



Observa-se um aumento na taxa de geração de entropia do sistema à medida que a temperatura do grão aumenta este fato pode ser explicado pela relação direta entre a entropia e a temperatura do sistema. Apesar de ser uma informação nova, quando comparada com as usualmente utilizadas, sua utilização isolada não acrescenta ponto a ser melhorado.

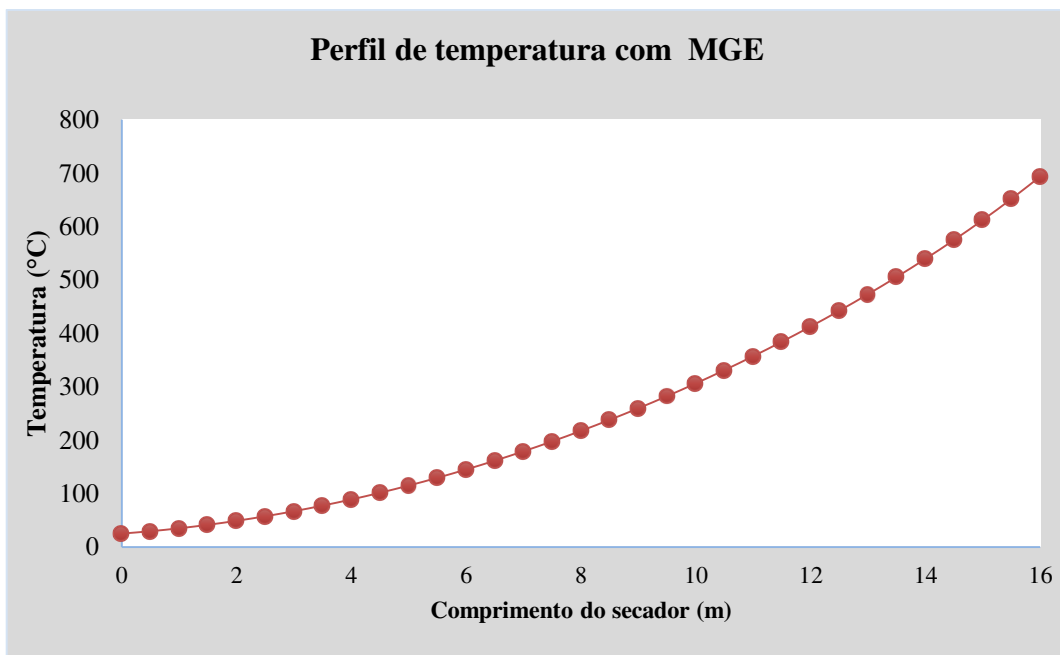
Porém, o processo de secagem pode ser otimizado a partir das observações de um sistema sem geração de entropia utilizando o conceito de minimização entrópica, com ela uma nova curva de temperatura pode ser obtida, utilizando a Equação 57:

$$\dot{\sigma} = -\frac{k}{T}\nabla^2 T \quad (\text{Eq. 57})$$

$$-\frac{k}{T}\nabla^2 T = 0 \quad (\text{Eq. 57.1})$$

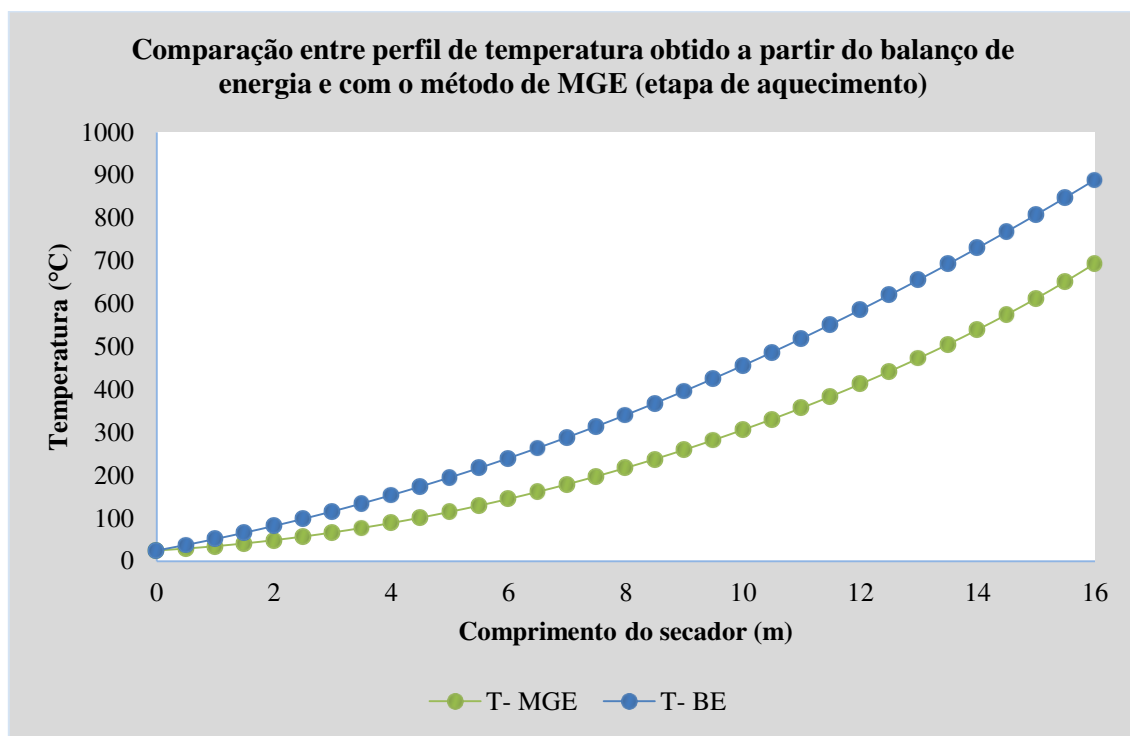
Desdobrando a equação podemos identificar uma equação diferencial ordinária de segunda ordem onde T é uma função do comprimento do secador. Com a utilização da Equação 57.1 pode ser traçada uma nova curva para o perfil de temperatura do grão no período de aquecimento. A Figura 16 mostra o novo perfil de temperatura obtido a partir da minimização da taxa de geração de entropia.

Figura 16- Perfil temperatura com minimização da taxa de geração de entropia ao longo do comprimento do secador.



Quando comparamos o perfil de temperatura usual com o obtido a partir da hipótese de minimização entrópica, observa-se um diferencial de temperatura ao longo de todo o comprimento do secador como mostram as curvas na Figura 17.

Figura 17- Comparação entre os perfis de temperatura do grão ao longo do secador: Perfil normal x Perfil com minimização entrópica



Observa-se que o perfil de temperatura é mais acentuado após o grão atingir sua temperatura de secagem. O aumento progressivo de temperatura pode tornar o grão frágil, retirando água de sua formação, o que não é interessante para a qualidade do produto final.

A partir dos perfis de temperatura para o grão, tanto no processo usual a partir da transferência de calor como com o processo minimizado, é possível verificar que a temperatura de secagem do grão é atingida nos primeiros trechos do secador. Assim a otimização do processo pode ir além das questões de controle, mas também para as questões de dimensões do equipamento. Quando utilizadas as avaliações da aplicação da MGE no sistema, o comprimento do secador pode ser um item crítico que pode ser reduzido ocasionando assim redução nos custos de compra/montagem do equipamento que geralmente apresente grandes dimensões.

9.0 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

No presente trabalho foi proposta uma abordagem termodinâmica para o controle de processo através da minimização da taxa de geração de entropia visando o aumento da eficiência do processo de secagem. A partir das análises dos perfis de umidade e temperatura, podemos verificar que o modelo proposto está de acordo com os modelos já disponíveis na literatura, uma vez que há redução de umidade do sólido associado à elevação de temperatura.

Com os resultados obtidos podemos sugerir que o uso do conceito da minimização da taxa de geração de entropia- MGE deve ser incluído nas análises de projetos em plantas industriais. A partir dela teremos informações complementares para determinar dimensões de equipamentos e avaliar melhor os processos.

No caso do processo de secagem do grão de milho, com a utilização da MGE obteve-se um perfil de temperatura menos acentuado que o perfil obtido com o balanço de energia usual. Este comportamento pode significar um custo energético reduzido no sistema de secagem, conhecido por ser tão oneroso para as plantas que o utilizam, sem redução de qualidade, uma vez que todas as análises realizadas no sistema foram baseadas na restrição da temperatura de secagem para o grão.

A conclusão que pode ser inferida é que o comportamento teórico obtido com os dados de um sistema de secagem pode ser utilizado em plantas industriais de pequena escala para avaliações e validações experimentais da metodologia que já apresentou resultados relevantes em sistema reativos, podendo apresentar maior eficiência em processos simples de secagem onde ocorrem basicamente trocas de massa e temperatura ao longo do sistema.

10.0 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALONSO, L. F. T., PARK, K. J., Métodos de seleção de secadores. Ciênc. Tecnol. Aliment., Campinas, 25(2): 208-216, abr.-jun. 2005

ARRUDA, E. B., TESE: Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: Secagem de fertilizante. Universidade Federal de Uberlândia- Faculdade de Engenharia Química, 2008.

BAUMAN, R.P. Introdução ao equilíbrio termodinâmico. Ed. Edgard Blücher, 140 p. São Paulo, 1972.

BEJAN, A., - Transferência de Calor. Editora Edgard Blucher Ltda, São Paulo, 1996.

BEJAN, A., Constructal theory of pattern formation. Hydrol. Earth Syst. Sci., 11, 753–768, 2007

BEJAN, A., Entropy generation minimization: The new thermodynamics of finite-size devices and finite-time processes, J. Appl. Phys., v. 79, n. 3, p. 1191 – 1218, February 1996.

BEJAN, A., Fundamentals of exergy analysis, entropy generation minimization and the generation of flow architecture. Int J. Energy Res., V26, p.545-565, 2002.

BISPO, H. Análise e Otimização de Sistemas Reativos via Modelagem Entrópica. 2009. Dissertação (Mestrado em engenharia Química) – Universidade Federal da Bahia (UFBA). Salvador. 2009.

ÇENGEL, Y.A.; BOLES M.A.; Termodinâmica. Editora McGraw-Hill, 7º Edição, 2012.

COSTA, D.R., FILHO, A.F.L., SILVA, J.S., QUEIROZ, D.M., DADALTO, J.P., Análise de sistema de secagem de milho em secador rotativo. Engenharia na Agricultura, Viçosa-MG, 2010.

CRISTO, H.O., “Modelagem, Simulação e Projeto de Secadores Rotatórios Diretos”, MSC., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2004.

CHAPRA, S.C. Métodos Numéricos Aplicados com Matlab para Engenheiros e Cientistas. 3º Edição. Editora AMGH, 2013.

CONAB- Companhia Nacional de Abastecimento: Acompanhamento da safra brasileira de grãos. V.3 Safra 2015/2015 N.5- Quinto levantamento- Fev. 2016. (Disponível em http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_02_04_11_21_34_boletim_graos_fevereiro_2016_ok.pdf Acessado em 20 de Janeiro de 2016).

CRISTO, H.O.; Modelagem, Simulação e Projeto de Secadores Rotatórios Diretos, MSC., Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, 2004.

FERNANDES, F. A.F.; PIZZO, S. A.; MORAES JUNIOR, D. Termodinâmica Química –Universidade Federal do Ceará - 1ªEdição. 2006. Disponível em http://www.eq.ufc.br/MD_Termodinamica.pdf Acessado em 20 de Janeiro de 2016.

FOUST, A., WENZLE, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., BRYCE, A. L. Transferência simultânea de calor e de massa. In Princípio das operações unitárias. Rio de Janeiro:Guanabara Dois S.A., 1982.

GIANGASPERO, G.; SCIUBBA, E.; Enrico. Application of the EGM method to a LED-based spotlight: a constrained pseudo-optimization design process based on the analysis of the local entropy generation maps. Open Acces entropy, journal ISSN 1099-4300, 2011.

GOMES,T., BISPO,H. , SILVA, N. and MANZI, J. Analysis of the Monochloroacetic Acid Crystallization Process by Entropic Modeling, Chemical Engineering Transactions, Vol.32, (2013) 2071-2076.

HALVORSEN, I.J. E SKOGESTAD, S. –Integrated Column Designs for Minimum Energy and Entropy Requirements in Multicomponent Distillation, Nordic Control Workshop, Abo Finland, August 2001.

INCROPERA et al, Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa , 6 ed. Rio de Janeiro, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora S.A, 2008.

IGUAZ, A., ESNOZ, A., MARTINEZ, G., LOPEZ, A., VIRSEDA, P., MATHEMATICAL MODELLING AND SIMULATION OF THE DRYING PROCESS OF VEGETABLE WHOLESALE BY-PRODUCTS IN ROTARY DRYER. Journal of food Engineering, 2003.

JOHANNESSEN, E., KJELSTRUP, S., Minimum Entropy Production Rate in Plug Flow Reactors: An Optimal Control Problem solved for SO₂ Oxidation, Energy, v. 29, p. 2403 - 2423, 2004.

LISBOA, M. H., ALVES, M.C., VITORINO, D.S., DELAIBA, W.B., FINZER, J. R. D., BARRAZO, M.A.S., STUDY OF THE PERFORMANCE OF THE ROTARY DRYER WITH FLUIDIZATION, Proceedings of the 14th International Drying Symposium-2004.

MANZI, J. and CARRAZZONI, E. – Analysis and Optimization of a CSTR by Direct Entropy Minimization, Journal of Chemical Engineering of Japan 41 (2008) 194- 199.

MANZI, J., VIANNA, R., BISPO, H. Direct entropy minimization applied to the production of propylene glycol. Chemical Engineering and Processing: Process Intensification, V.48. N°1. pp 470-475, 2009.

MYKLESTAD, O. Heat and massa transfer in Rotary dryer. Chemical Engineering Progress, 1963, v.13,p. 129-137.

MUJUNDAR, A. S., 1997, Drying fundamentals, in Industrial Drying of food, Ed. Baker, C.G.J.

NONHEBEL, M. A. G. MOSS, A. A. H., *Drying of Solids in the Chemical Industry*. Butterworths, Londres, Inglaterra, p.301, 1971.

NUNES, J. L. S., *Secagem, Beneficiamento e Armazenagem*. Por: AGROLINK - Admin Publicado em 12/09/2016.

PAIM, Ágata, BOBET: *Abordagem termodinâmica para a otimização e o controle de processos*. Dissertação mestrado- Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 2013.

PARK, K.J., YADO, M.K. M.; BROD, F. P.R., *Estudo de secagem de pêra Bartlett em fatias*. *Ciência Tecnológica dos Alimentos*. Vol 21. Nº 3- Campinas 2001.

PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; *Método de Seleção de Secadores*. *Ciênc. Tecnol. Alimentos*, Campinas, 25(2): 208-216, abr.-jun. 2005

PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T.; *Método de Seleção de Secadores*. *Ciênc. Tecnol. Alimentos*, Campinas, 25(2): 208-216, (2007).

PERES-CORREA, J.R., CUBLHOS, F., ZAVALA, E., SHENE, C., ALVAREZ, P.I., *Dynamic simulation and controlo f direct Rotary dryers*. *Control Food*, 1998.

PERRY, R.H., GREEN, D.W., *Perry's Chemical Engineers' Handbok* Mac Graw-Hill, 7th Cd-ROM, Nova York, Estados Unidos, 1999.

PIMENTEL, M.A.G., Fonseca, M.J.O, EMBRAPA- *Cultivo do milho*. Embrapa Milho e Sorgo- Sistema de Produção, 1 ISSN 1679-012X Versão Eletrônica - 7ª edição Set./2011.

REZENDE, D. R., *Modelagem e simulação da secagem de frutos de café em um secador de bandejas vibradas*. Universidade Federal de Uberlândia, 2011.

SANTOS, M. T. *Análise exergética dos sistemas térmicos em um processo de produção de celulose e papel*. 2007, P. 190. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

SECCHI, A.R., *Modelagem e Simulação de Processos*. Parte I- Introdução. Departamento de Engenharia Química- Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (1995).

SILVA, S.C.; COSTA JUNIOR, E.F.; COSTA, A.O.S. *Proposta de análise exergética de um sistema real presente na rota kraft de obtenção de celulose*. In: II Seminário de Engenharia Química da Universidade Federal do Espírito Santo, 2012. Alegre- ES. V2, 2012 P6.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. 448p

SAVARESI, M. S., BITMEAD, R. R., PIERCE, R., *On modelling and controlo f Rotary sugar dryer*. *Control Engineering Pratices*- 2001.

TSAO, G. T., WHEELLOCK T.D., Drying Theory and Calculations, Iowa State University, 1967.

VAN NESS, H.C., SMITH, J.M and ABBOTT, M.M. – Introdução a Termodinâmica da Engenharia Química, LTC-Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda, 2007.