



INTERFACE GRÁFICA PARA AUXILIAR DIMENSIONAMENTO DE TRILHAS EM CIRCUITO IMPRESSO

Evandro Rostirolla Bortoloto
evandrobor@gmail.com
UNITAU

Francisco Carlos Parquet Bizarria
fcpbiz@gmail.com
UNITAU

José Walter Parquet Bizarria
jwpbiz@gmail.com
UNITAU

Resumo: Este trabalho apresenta as principais etapas realizadas no desenvolvimento e na validação de uma interface gráfica para ser integrada com algoritmo que executa o equilíbrio térmico no dimensionamento de trilhas estabelecidas em placas de circuito impresso. Essa interface tem como meta auxiliar o seu usuário na determinação de dimensões de trilhas que são definidas durante a elaboração de projetos de sistemas eletrônicos de potência e que utilizam laminados cobreados, a partir de características ambientais relacionadas com o local de instalação, o fluido em contato com o material, e a disposição física do sistema, contribuindo dessa forma para aperfeiçoar leiautes de componentes eletrônicos, automatizar processos de manufatura e reduzir custos de produção. A validação dos recursos virtuais e das funcionalidades estabelecidas nessa interface foi obtida por meio da parametrização de valores e condições de uso da placa de circuito impresso e, também, com comparações com diretrizes contidas em norma afim. Os resultados positivos alcançados com os testes de validação realizados sugerem que essa interface gráfica é adequada para a finalidade a qual se destina.

Palavras Chave: Dimensionamento - Trilhas - Circuito Impresso - Interface Gráfica - Eletrônica

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, os diversos tipos de equipamentos utilizados pela sociedade têm seu funcionamento baseado nos princípios da eletrônica, sendo que a constante evolução da tecnologia dos materiais voltados para eletrônica tem contribuído, principalmente, na eficiência elétrica e térmica de componentes, favorecendo a miniaturização e possibilitando melhorar a automação dos processos de manufatura, permitindo que a fase de integração siga as tendências mundiais da técnica SMT (*Surface Mounting Technology*), na qual máquinas de inserção com alto desempenho, denominadas *Pick and Place*, são utilizadas para instalação dos componentes sobre a superfície de uma placa de circuito impresso (PINTO, 2013).

A referência principal para o cálculo de vias ou trilhas destinadas às interconexões elétricas em laminados cobreados é a norma técnica IPC 2221 (*Association Connecting Electronics Industries*), sendo essa destinada aos circuitos eletrônicos em geral (IPC 2221, 2003).

Nesse contexto, este trabalho apresenta as principais etapas do desenvolvimento e da validação de uma interface gráfica para ser integrada com algoritmo que executa o equilíbrio térmico no dimensionamento de trilhas estabelecidas em placas de circuito impresso, as quais são utilizadas prioritariamente para atender circuitos eletrônicos de potência.

A validação dos recursos virtuais e das funcionalidades estabelecidas nessa interface foi obtida por meio da parametrização de valores e condições de uso da placa de circuito impresso e, também, com comparações com diretrizes contidas na norma técnica IPC 2221.

2. OBJETIVOS

Os principais objetivos deste trabalho são: i) apresentar as etapas básicas executadas no desenvolvimento de interface gráfica para ser integrada com algoritmo que realiza dimensionamento de trilhas de placas de circuito impresso, ii) mostrar os resultados mais relevantes que foram obtidos com os testes de validação dessa interface gráfica e iii) comparar com resultados calculados por meio de diretrizes contidas na norma técnica IPC 2221.

3. METODOLOGIA

Os procedimentos estabelecidos e aplicados no desenvolvimento e na validação da mencionada interface gráfica são apresentados a seguir:

- Realizar pesquisa bibliográfica, direcionada principalmente em identificar trabalhos cujos conceitos tenham como base o dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso aplicadas em eletrônica de potência.
- Elaborar proposta de arquitetura, física e lógica, para um sistema ser capaz de auxiliar o seu usuário no dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso.
- Estabelecer as janelas para interface gráfica, com leiaute de componentes virtuais contendo, principalmente, meios para: i) definir parâmetro a ser calculado, ii) selecionar materiais e meio de operação, iii) determinar características geométricas e configurar modo de instalação e operação dos elementos, e iv) gerar resultados relacionados ao dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso.
- Parametrizar valores específicos e dimensionar trilhas por meio dos recursos contidos na interface gráfica, com o propósito de utilizar os resultados obtidos na validação da eficácia do sistema.
- Elaborar texto explicitando os resultados pertinentes obtidos nos itens anteriores.

4. DESENVOLVIMENTO

A etapa do desenvolvimento abrange a definição de requisitos e a concepção do protótipo, conforme explicitado nos subitens seguintes.

4.1. REQUISITOS DO SISTEMA

Os requisitos básicos que devem ser atendidos por uma arquitetura de sistema, baseada em computador digital, para que essa seja capaz de alojar a interface gráfica integrada com o algoritmo, são divididos em lógicos e físicos.

4.1.1. REQUISITOS LÓGICOS

Os requisitos lógicos previstos para aludida arquitetura são apresentados na Tabela 1. Nessa tabela, as informações encontram-se enumeradas pela coluna denominada por “Item”, as demandas a serem atendidas são apresentadas na coluna “Descrição do Requisito” e as características relacionadas com as funcionalidades estão na coluna “Tipo”.

Tabela 1: Requisitos Lógicos.

Item	Descrição do Requisito	Tipo
1	<p>Ambiente integrado de desenvolvimento da interface gráfica deverá:</p> <p>1.1- Permitir a elaboração de janelas dedicadas para operar na camada do aplicativo de computador hospedeiro, com arquitetura Intel® de 64 bits ou equivalente, munido de sistema operacional.</p> <p>1.2- Conter meios que permitam realizar a integração da interface gráfica com o algoritmo para o dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso.</p> <p>1.3- Possuir exatidão adequada para manipular os valores parametrizados pelo usuário e necessários para a correta operação do algoritmo.</p>	Funcional
2	<p>Interface gráfica deverá conter as seguintes janelas:</p> <p>2.1- Janela de Aceite: deve explicitar as condições que o usuário do sistema aceitará para utilizar os recursos da interface gráfica integrada com algoritmo.</p> <p>2.2- Janela de Parametrização: deve conter os campos para o usuário preencher valores necessários à realização do dimensionamento de trilhas em circuito impresso, em conformidade com o tipo e as características específicas de aplicação.</p> <p>2.3- Janela de Material: deve conter campos para definir um novo material, com as respectivas propriedades para a camada condutora da placa de circuito impresso.</p> <p>2.4- Janela de Fluido: deve conter campos para definir um novo fluido, com as respectivas propriedades para o meio no qual a placa de circuito impresso será utilizada.</p>	Funcional
	<p>2.5- Janela de Ajuda: deve apresentar texto com informações básicas para orientar o usuário na utilização do aplicativo para dimensionamento de trilhas em circuito impresso.</p>	Não Funcional
3	<p>Hierarquia de acesso:</p> <p>3.1- O usuário após ativar o aplicativo deverá ser submetido à Janela de Aceite, na qual o mesmo deve concordar com os termos de uso que são estabelecidos para utilização do sistema ou, considerando a hipótese de o usuário não concordar com esses termos, o aplicativo será finalizado.</p> <p>3.2- A Janela de Aceite deve permitir, a partir das condições descritas no subitem anterior, acesso aos recursos contidos na Janela de Parametrização.</p> <p>3.3- A Janela de Parametrização deve permitir acesso indireto a Janela de Material e Janela de Fluido, e acesso direto a Janela de Ajuda.</p>	Funcional

Fonte: Autor (2019)

O mapa mental que representa os aludidos requisitos lógicos é apresentado na Figura 1, o qual foi elaborado com recursos contidos no ambiente integrado de desenvolvimento do aplicativo que é denominado por FreeMind (Kumar, 2006) e sintetiza graficamente os

principais campos que devem estar presentes nas janelas da interface gráfica e, também, a hierarquia estabelecida para o acesso do usuário nos vários níveis do aplicativo, em conformidade com os critérios mencionados na Tabela 1.

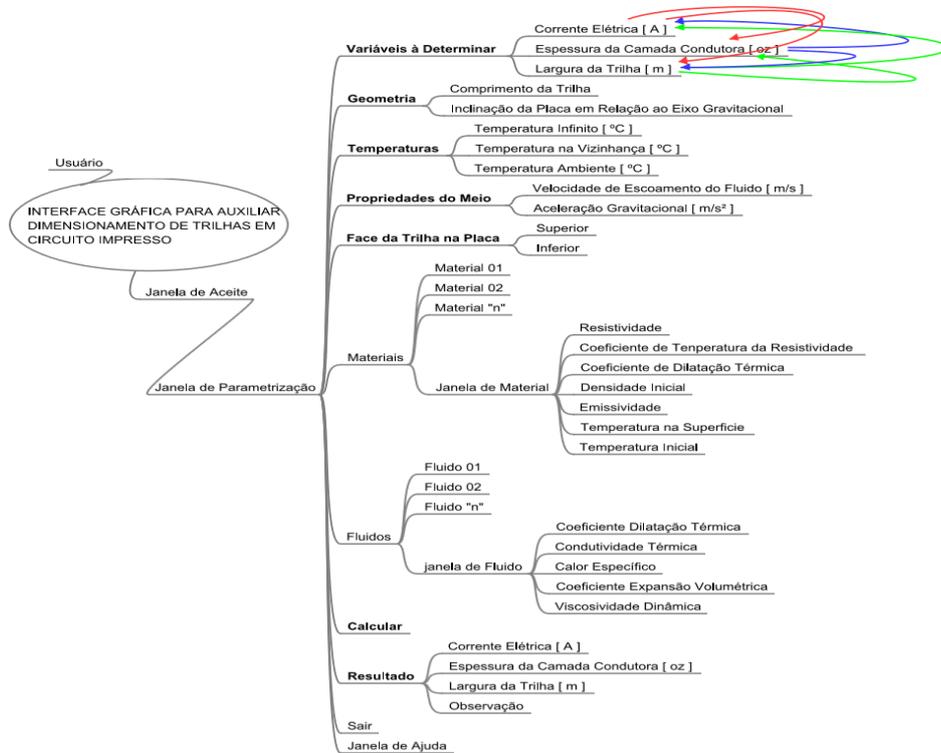


Figura 1: Mapa Mental da Interface Gráfica.
Fonte: Autor (2019)

4.1.2. REQUISITOS FÍSICOS

Os requisitos físicos previstos para a arquitetura de um sistema ser capaz de integrar a mencionada interface gráfica são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2: Requisitos Físicos.

Item	Descrição do Requisito	Tipo
1	Arquitetura deve possuir:	
	1.1- Recursos para atender o sistema operacional e as interfaces homem-computador que são necessárias para utilização das janelas do aplicativo.	Funcional
	1.2- Capacidade de processamento e exatidão adequados para tratar os valores parametrizados, executar o algoritmo e apresentar os resultados compatíveis com o propósito deste trabalho.	
	1.3- Sinalizações visuais e/ou sonoras para indicar a operação em regime normal e/ou em condição de anomalia do sistema.	Não Funcional

Fonte: Autor (2019)

4.2. PROTÓTIPO

Para validar os recursos virtuais estabelecidos nas janelas da mencionada interface, foi montado um protótipo para executar os testes afins.

4.2.1. ARQUITETURA DO PROTÓTIPO

A arquitetura estabelecida para o protótipo ser capaz de alojar a Interface Gráfica (IG) integrada com algoritmo para auxiliar o dimensionamento de trilhas em circuito impresso é apresentada na Figura 2.



Figura 2: Arquitetura Proposta.
Fonte: Autor (2019)

Os acrônimos definidos para os blocos contidos na arquitetura do protótipo, mostrados na Figura 2, possuem os significados e as características conforme a seguinte descrição:

- CH: Computador Hospedeiro, do tipo portátil (*notebook*), baseado em arquitetura Intel[®] de 64 bits e com sistema operacional Windows 10[™] de 64 bits.
- IG: Interface Gráfica, alojada na camada do aplicativo do sistema operacional, instalado no computador hospedeiro (CH), sendo que as janelas previstas nessa interface foram elaboradas com os recursos disponíveis no ambiente integrado de desenvolvimento denominado Matlab[®], sob licença: STUDENT, da Matworks Inc. (MATHWORKS, 2018).

4.2.2. INTERFACE GRÁFICA

A Interface Gráfica (IG) é composta por janelas específicas, nas quais estão presentes os recursos que permitem ao usuário realizar: i) acesso, parametrização, ii) definição de propriedades, iii) comandar a execução de algoritmo, iv) visualizar resultados, e v) obter ajuda, conforme descrito nos subitens pertinentes a seguir.

4.2.2.1. JANELA DE ACESSO

Ao iniciar o aplicativo da Interface Gráfica (IG), o usuário será submetido à Janela de Acesso, na qual estão presentes informações básicas de aceite para uso do aplicativo e botões com textos que permitem seleção de possibilidades, conforme apresentado na Figura 3.



Figura 3: Janela de Acesso.
Fonte: Autor (2019)

Considerando essa janela, na hipótese de acionamento do botão CONCORDO, usuário aceita plenamente os termos de uso do aplicativo e tem acesso a Janela de Parametrização.

Na hipótese de acionamento do botão DISCORDO, o aplicativo será finalizado, o que impossibilita o usuário fazer uso dos recursos contidos nas janelas da Interface Gráfica (IG).

4.2.2.2. JANELA DE PARAMETRIZAÇÃO

Após concordar com os termos de uso, o usuário tem acesso aos recursos virtuais estabelecidos na Janela de Parametrização, apresentados na Figura 4.

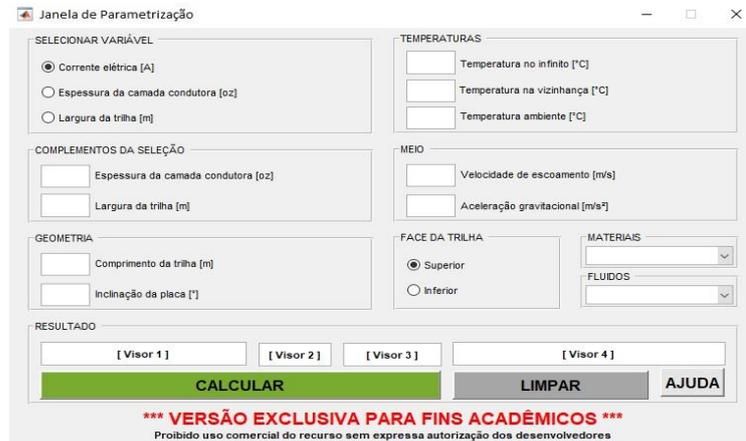


Figura 4: Janela de Parametrização.

Fonte: Autor (2019)

Nessa Janela de Parametrização estão presentes os campos que o usuário deve preencher para realizar o dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso, sendo que o limite superior e inferior estabelecidos para cada variável são apresentados na Tabela 3. Nesse sentido, cabe mencionar que tentativas de registros de valores fora da faixa estabelecida nessa tabela não serão aceitos pelos campos da mencionada janela.

Tabela 3: Limites na Janela de Parametrização.

Variável	Unidade	Limites	
		Inferior	Superior
Corrente elétrica	A	0	100
Espessura da camada condutora	oz	1	10
Largura da trilha	m	0	1
Comprimento da trilha	m	0	10
Inclinação da placa	°	0	90
Temperatura no infinito	°C	-55	125
Temperatura na vizinhança	°C	-55	125
Temperatura ambiente	°C	-55	125
Velocidade de escoamento	m/s	0	10
Aceleração gravitacional	m/s ²	0	10

Fonte: Autor (2019)

Os campos relacionados com variáveis a serem preenchidas, opções para seleção de variáveis, condições, materiais e fluidos, contidos na Janela de Parametrização, estão destacados em regiões indicadas na Figura 5.

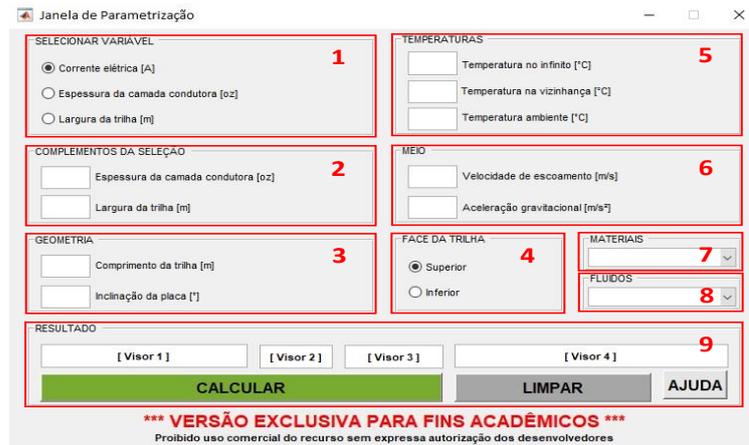


Figura 5: Regiões da Janela de Parametrização.

Fonte: Autor (2019)

Na Tabela 4 estão descritas as principais informações relacionadas aos campos contidos nas regiões indicadas na Figura 5.

Tabela 4: Campos da Janela de Parametrização.

Região	Campo	Unidade	Descrição
1 SELECIONAR VARIÁVEL	Corrente elétrica	A	Será calculado o valor máximo, em regime permanente, suportada pela trilha condutora da placa de circuito impresso, considerando o valor definido para a espessura da camada condutora [oz] e largura da trilha [m].
	Espessura da camada condutora	oz	Será calculado o valor mínimo dessa variável para a trilha condutora da placa de circuito impresso, considerando o valor definido para a corrente elétrica [A] e largura da trilha [m].
	Largura da trilha	m	Será calculado o valor mínimo dessa variável para a trilha condutora da placa de circuito impresso, considerando o valor definido para a corrente elétrica [A] e espessura da camada condutora [oz].
2 COMPLEMENTOS DA SELEÇÃO	-	-	Contém campos que possibilitam definir valores para as grandezas não selecionadas na região 1.
3 GEOMETRIA	Comprimento da trilha	m	Distância do percurso da trilha condutora na placa de circuito impresso considerada no dimensionamento.
	Inclinação da placa	°	Ângulo entre o eixo gravitacional e a face na qual a trilha está estabelecida.
4 FACE DA TRILHA	Superior	-	Face da placa de circuito impresso na qual a energia térmica liberada é transferida sem a interferência dessa superfície para o meio.
	Inferior	-	Face na qual a própria placa se opõe ao deslocamento do fluido, nessa condição o fluido necessita deslocar-se até as bordas de contorno para seguirem na direção da força de empuxo.
5 TEMPERATURAS	Temperatura no infinito	°C	Temperatura considerada em região muito distante da trilha, ou seja, a troca térmica é desprezível a essa distância.
	Temperatura na vizinhança	°C	Temperatura considerada em região próxima da trilha, ou seja, a troca térmica é considerada a essa distância.
	Temperatura ambiente	°C	Temperatura considerada na região da trilha, ou seja, diretamente em contato com essa e no seu entorno.
6	Velocidade de	m/s	Magnitude física que expressa à variação na posição do



Região	Campo	Unidade	Descrição
MEIO	escoamento		fluido por unidade do tempo.
	Aceleração gravitacional	m/s ²	Intensidade do campo gravitacional exercido sobre a trilha no local considerado para instalação da placa de circuito impresso.
7 MATERIAIS	Padronizado	-	Lista com informações sobre tipos de materiais e características utilizadas na fabricação de placas de circuito impresso, as quais estão previamente carregadas no aplicativo.
	Personalizado	-	Conforme indicado na Figura 6 (a), a seleção dessa opção habilita janela específica que permite ao usuário definir valores para um determinado material, relacionados com: i) Resistividade [$\Omega.m$], ii) Coeficiente de temperatura da resistividade [K^{-1}], iii) Coeficiente de dilatação térmica [$^{\circ}C^{-1}$], iv) Massa volumétrica inicial do material [kg/m^3], v) Emissividade [1], vi) Temperatura na superfície [K], e vii) Temperatura inicial [K].
8 FLUIDOS	Padronizado	-	Lista com informações sobre tipos de fluidos e características de substâncias que podem fluir ou escoar no meio em que a placa de circuito impresso está contida.
	Personalizado	-	Conforme indicado na Figura 6 (b), a seleção dessa opção habilita janela específica que permite ao usuário definir valores para um determinado fluido, relacionados com: i) Coeficiente de dilatação térmica [$^{\circ}C^{-1}$], ii) Condutividade térmica do fluido [$W/m.K$], iii) Massa volumétrica Inicial do fluido [kg/m^3], iv) Calor específico do fluido [$J/kg.K$], v) Coeficiente de expansão volumétrica do fluido [K^{-1}], e vi) Viscosidade dinâmica do fluido [$N.s/m^2$].
9 RESULTADO	CALCULAR	-	O usuário ao finalizar as parametrizações necessárias, poderá ativar esse botão para iniciar o algoritmo que executa o cálculo de equilíbrio térmico.
	VISUALIZAR RESULTADOS	-	Estão previstos os seguintes campos de visualização de resultados: i) visor (1) para a grandeza calculada (corrente elétrica, espessura da camada condutora ou largura da trilha), ii) visor (2) para o valor numérico da grandeza calculada, iii) visor (3) para a unidade de medida da grandeza calculada (Ampère, metro ou onça), e iv) visor (4) apresenta conformidade ou adversidades nos parâmetros e condições calculadas.
	LIMPAR	-	Esse botão possibilita ao usuário remover os valores parametrizados e resultados obtidos e, dessa forma, permite a realização de novo dimensionamento de trilha.
	AJUDA	-	Conforme indicado na Figura 7, a ativação desse botão habilita a Janela de Ajuda, a qual contém informações básicas referentes à utilização da Interface Gráfica (IG).

Fonte: Autor (2019)

As janelas denominadas por Material Personalizado e Fluido Personalizado, mencionadas na Tabela 4, contendo os campos relacionados com variáveis específicas que devem ser preenchidas são apresentadas na Figura 6.

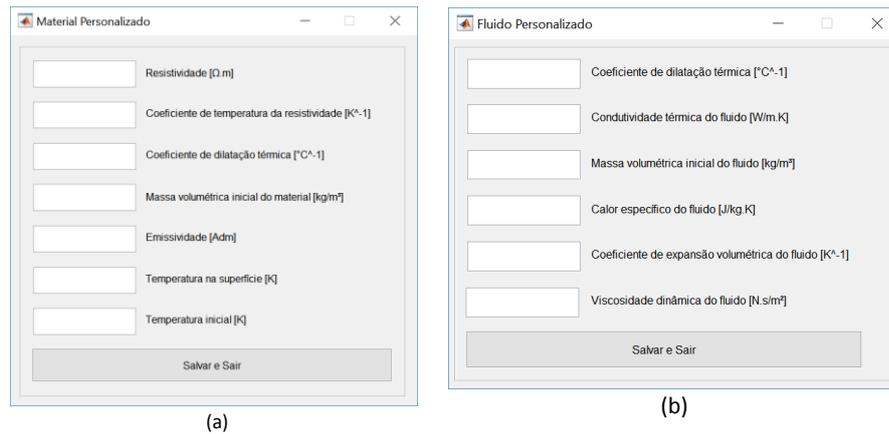


Figura 6 – (a) Material Personalizado, (b) Fluido Personalizado.
Fonte: Autor (2019)

A Janela de Ajuda, citada na Tabela 4, é apresentada na Figura 7, sendo que essa totaliza os componentes virtuais previstos na referida Interface Gráfica (IG).

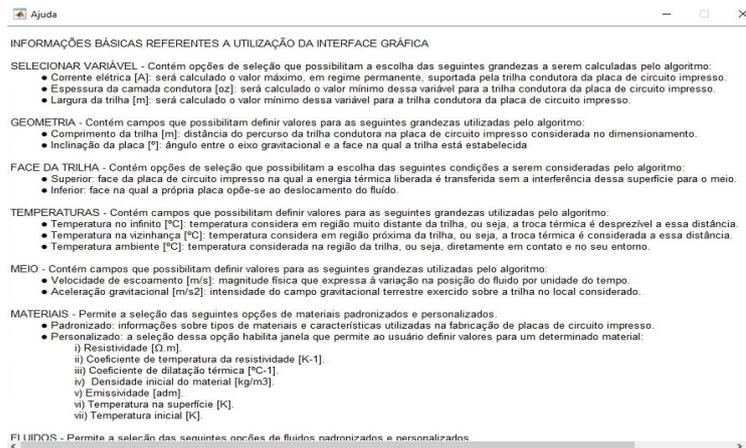


Figura 7 – Janela de Ajuda.
Fonte: Autor (2019)

4.2.3. ALGORITMO

Dentre as várias funções que podem ser realizadas com os recursos previstos na Interface Gráfica (IG) estão àquelas relacionadas com a tarefa de carregar os valores, parametrizados pelo usuário, nas variáveis contidas em equações de equilíbrio térmico e, também, comandar o início de execução dos passos utilizados pelo algoritmo para efetuar os cálculos destinados ao dimensionamento de trilhas. O algoritmo ao finalizar esses cálculos, transferem os resultados obtidos para a janela da Interface Gráfica (IG), a fim de serem exibidos ao usuário do aplicativo.

Nesse sentido, uma sequência específica de ações prevista nesse algoritmo é representada na Figura 8, por meio de fluxograma sintético que retrata os principais passos do programa utilizado nos testes práticos realizados neste trabalho.

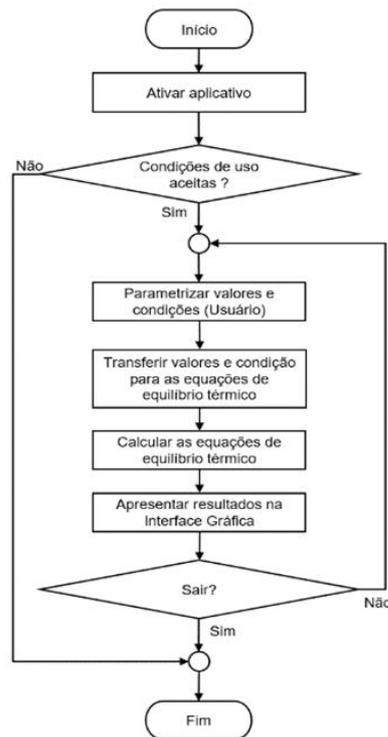


Figura 8 – Fluxograma Sintético.
Fonte: Autor (2019)

4.2.4. TESTES PRÁTICOS – INTERFACE GRÁFICA

A avaliação da eficácia dos componentes virtuais previstos nas janelas da Interface Gráfica (IG), para operar de modo integrado com algoritmo dedicado ao dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso, foi dividida em cinco etapas, sendo que para essas os valores que foram definidos nos campos da Janela de Parametrização da Interface Gráfica (IG) são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Valores para aplicação experimental.

Variável	Unidade	Valor
Corrente elétrica	A	Variável Seleccionada
Espessura da camada condutora	oz	1
Largura da trilha	m	0,005 ~ 0,050
Comprimento da trilha	m	0,200
Inclinação da placa	°	0 ~ 90
Temperatura no infinito	°C	25
Temperatura na vizinhança	°C	25
Temperatura ambiente	°C	25
Velocidade de escoamento	m/s	0 ~ 1
Aceleração gravitacional	m/s ²	9,7864

Fonte: Autor (2019)

4.2.4.1. PRIMEIRA ETAPA DE TESTE: PLACA VERTICAL

Na primeira etapa de teste é considerada a convecção natural laminar atuando sobre uma superfície específica de placa plana isotérmica, disposta verticalmente em um grande meio quiescente, nessa condição, o valor da aceleração gravitacional, g [m/s²], é corrigido

para placas com inclinação entre $0 \leq \theta \leq 60^\circ$, em relação ao eixo gravitacional (INCROPERA & LAVINE, 2015).

A sequência de parametrização e cálculos é repetida para diversos valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 – Largura x Corrente elétrica / Placa vertical / $\theta = 0^\circ$

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	8,384	Condições válidas	0,030	36,467	Condições válidas
0,010	14,520	Condições válidas	0,035	41,670	Condições válidas
0,015	20,266	Condições válidas	0,040	46,809	Condições válidas
0,020	25,791	Condições válidas	0,045	51,896	Condições válidas
0,025	31,184	Condições válidas	0,050	56,938	Condições válidas

Fonte: Autor (2019)

Mantida a sequência de parametrização e cálculos apresentados, exceto pela mudança na inclinação da placa de 0° para 60° , foram repetidos os dimensionamentos para os demais valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Largura x Corrente elétrica / Placa vertical / $\theta = 60^\circ$.

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	7,923	Condições válidas	0,030	33,941	Condições válidas
0,010	13,617	Condições válidas	0,035	38,759	Condições válidas
0,015	18,940	Condições válidas	0,040	43,517	Condições válidas
0,020	24,062	Condições válidas	0,045	48,226	Condições válidas
0,025	29,050	Condições válidas	0,050	52,896	Condições válidas

Fonte: Autor (2019)

4.2.4.2. SEGUNDA ETAPA DE TESTE: PLACA HORIZONTAL – TRILHA NA FACE SUPERIOR

Na segunda etapa de teste é considerada a convecção natural atuando sobre a superfície superior aquecida ou superfície inferior resfriada de uma placa plana isotérmica, disposta horizontalmente em um grande meio quiescente, nessa condição é considerado o ângulo de inclinação da placa plana entre $60 < \theta \leq 90^\circ$, em relação ao eixo gravitacional (INCROPERA & LAVINE, 2015).

A sequência de parametrização e cálculos é repetida para os demais valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Largura x Corrente elétrica / Trilha na face superior.

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	7,107	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,030	34,935	Fora do intervalo Prandt
0,010	13,120	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,035	40,114	Fora do intervalo Prandt
0,015	18,805	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,040	45,243	Fora do intervalo Prandt
0,020	24,298	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,045	50,322	Fora do intervalo Prandt
0,025	29,664	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,050	55,358	Fora do intervalo Prandt

Fonte: Autor (2019)

4.2.4.3. TERCEIRA ETAPA DE TESTE: PLACA HORIZONTAL – TRILHA NA FACE INFERIOR

Na terceira etapa de teste é considerada a convecção natural atuando sobre a superfície superior resfriada ou superfície inferior aquecida de uma placa plana isotérmica, disposta horizontalmente em um grande meio quiescente, nessa condição é considerado o ângulo de inclinação da placa plana entre $60 < \theta \leq 90^\circ$, em relação ao eixo gravitacional (INCROPERA & LAVINE, 2015).

A sequência de parametrização e cálculos é repetida para os demais valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 – Largura x Corrente elétrica / Trilha na face inferior.

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	8,282	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,030	49,696	Fora do intervalo Prandt
0,010	16,565	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,035	57,978	Fora do intervalo Prandt
0,015	24,848	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,040	66,261	Fora do intervalo Prandt
0,020	33,130	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,045	74,544	Fora do intervalo Prandt
0,025	41,413	Fora do intervalo Reyleigh e Prandt	0,050	82,826	Fora do intervalo Prandt

Fonte: Autor (2019)

4.2.4.4. QUARTA ETAPA DE TESTE: CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO LAMINAR

Na quarta etapa de teste é considerada a convecção forçada com escoamento laminar, a qual ocorre quando o fluido que está em contato com a superfície e possui deslocamento paralelo em relação a face de uma placa plana isotérmica, com número de Reynolds $< 5 \times 10^5$, independe de sua orientação (INCROPERA & LAVINE, 2015).

A sequência de parametrização e cálculos é repetida para os demais valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Largura x Corrente elétrica / Escoamento laminar.

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	6,457	Fora do intervalo Reynolds	0,030	26,260	Fora do intervalo Reynolds
0,010	11,031	Fora do intervalo Reynolds	0,035	29,744	Fora do intervalo Reynolds
0,015	15,138	Fora do intervalo Reynolds	0,040	33,151	Fora do intervalo Reynolds
0,020	19,001	Fora do intervalo Reynolds	0,045	36,517	Fora do intervalo Reynolds
0,025	22,692	Fora do intervalo Reynolds	0,050	39,805	Fora do intervalo Reynolds

Fonte: Autor (2019)

4.2.4.5. QUINTA ETAPA DE TESTE: CONVECÇÃO FORÇADA – ESCOAMENTO TURBULENTO

Na quinta etapa de teste é considerada a convecção forçada com escoamento turbulento, a qual ocorre quando o fluido que está em contato com a superfície possui deslocamento paralelo em relação à face de uma placa plana isotérmica, com número de Reynolds entre 5×10^5 e 5×10^7 , independe de sua orientação (INCROPERA & LAVINE, 2015).

A sequência de parametrização e cálculos é repetida para os demais valores de largura de trilha [m], sendo que os resultados obtidos desses procedimentos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Largura x Corrente elétrica / Escoamento turbulento.

W [m]	I [A]	OBS	W [m]	I [A]	OBS
0,005	5,878	Fora do intervalo Reynolds	0,030	108,102	Fora do intervalo Reynolds
0,010	17,961	Fora do intervalo Reynolds	0,035	138,324	Fora do intervalo Reynolds
0,015	35,025	Fora do intervalo Reynolds	0,040	170,977	Fora do intervalo Reynolds
0,020	56,079	Fora do intervalo Reynolds	0,045	205,831	Fora do intervalo Reynolds
0,025	80,580	Fora do intervalo Reynolds	0,050	242,689	Fora do intervalo Reynolds

Fonte: Autor (2019)

5. TESTES DE VALIDAÇÃO

Com a meta de validar os resultados obtidos nos testes práticos efetuados com uso da Interface Gráfica (IG) integrada ao algoritmo apresentado nesse trabalho, é realizada a comparação entre esses resultados e as diretrizes contidas na norma técnica IPC 2221.

Nesta etapa, a meta está concentrada em aplicar as equações contidas na norma IPC 2221 (*Generic Standard on Printed Board Design – Padrão Genérico de Projetos em Placas de Circuito Impresso*) para obter valores de corrente elétrica I [A] em função das larguras de trilhas W [m].

A Tabela 12 apresenta os resultados das correntes em função das diversas larguras de trilhas consideradas, sendo que os valores contidos nessa tabela serão utilizados, posteriormente, para efetuar comparação com aqueles obtidos nos testes práticos efetuados com o uso da Interface Gráfica (IG) integrada ao algoritmo apresentado nesse trabalho.

Tabela 12 – Largura x Corrente elétrica – IPC 2221.

W [m]	I [A]	W [m]	I [A]
0,005	20,347	0,030	74,585
0,010	33,631	0,035	83,404
0,015	45,124	0,040	91,883
0,020	55,589	0,045	100,074
0,025	65,350	0,050	108,017

Fonte: Autor (2019)

Cabe mencionar que a máxima corrente elétrica recomendada pela norma técnica IPC 2221 é 35 A, sendo que os valores acima desse limite, contidos na Tabela 12, são utilizados como referência nas mencionadas comparações de resultados.

6. RESULTADOS

Neste item é realizada, principalmente, a comparação entre os resultados obtidos nas cinco etapas de testes efetuadas com a Interface Gráfica (IG) integrada ao algoritmo que realiza equilíbrio térmico, para as condições: i) placa vertical, ii) placa horizontal – trilha na face superior, iii) placa horizontal – trilha na face inferior, iv) convecção forçada – escoamento laminar, e v) convecção forçada – escoamento turbulento, com as diretrizes contidas na norma técnica IPC 2221. Na Figura 9 são apresentados esses resultados, em forma gráfica, para conjunto de largura de trilha [m] e corrente elétrica [A].

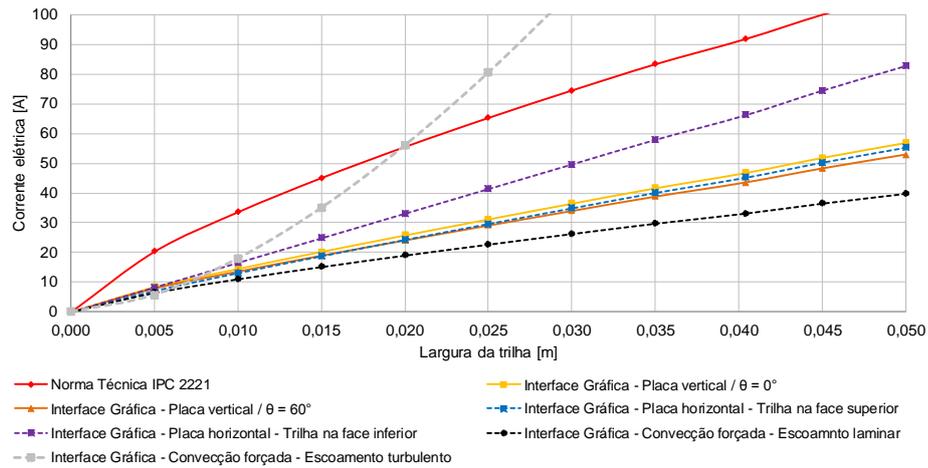


Figura 9 – Comparativo de resultados.

Fonte: Autor (2019)

Com a meta de efetuar comparações de dimensionamentos para condições equivalentes de utilização da placa de circuito impresso, na Figura 10 são apresentadas as curvas obtidas com: as parametrizações da Interface Gráfica (IG), e a utilização da norma técnica IPC 2221.

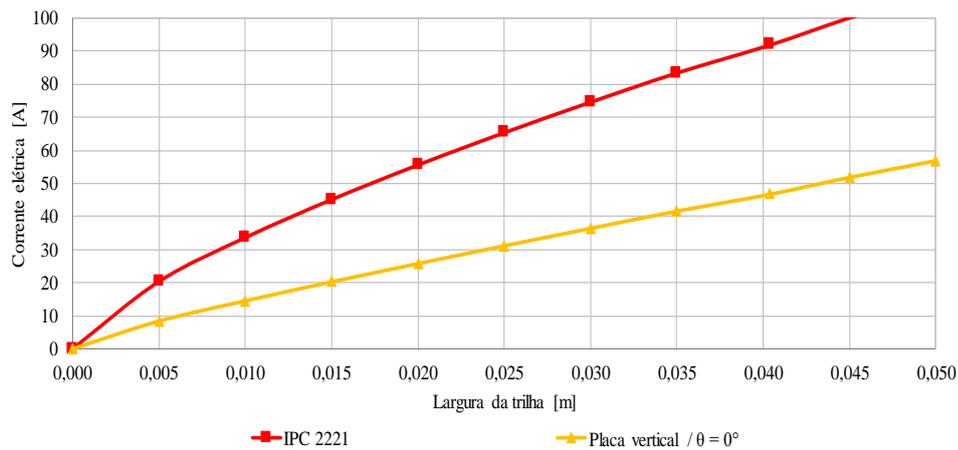


Figura 10 – Comparativo de condições equivalentes.

Fonte: Autor (2019)

As curvas mostradas no gráfico da Figura 10 permitem efetuar análise comparativa entre a variação absoluta (Δ) e percentual (%) da corrente elétrica I [A] para as diferentes larguras de trilha W [m], conforme apresentado na Tabela 13.

Tabela 13 – Comparativo de condições equivalentes.

W [m]	Placa vertical $\theta = 0^\circ$	IPC 2221		
	I [A]	I [A]	ΔI	%
0	0	0	0	0
0,005	8,384	20,347	11,967	143%
0,010	14,520	33,631	19,111	132%
0,015	20,266	45,124	24,854	123%
0,020	25,791	55,589	29,789	115%

W [m]	Placa vertical $\theta = 0^\circ$	IPC 2221		
	I [A]	I [A]	ΔI	%
0,025	31,184	65,350	34,160	110%
0,030	36,467	74,585	38,115	105%
0,035	41,670	83,404	41,734	100%
0,040	46,809	91,883	45,073	96%
0,045	51,896	100,074	48,174	93%
0,050	56,938	108,017	51,077	90%

Fonte: Autor (2019)

7. CONCLUSÕES

Os resultados positivos observados nos testes práticos realizados com a utilização da Interface Gráfica (IG) integrada ao algoritmo abordado neste trabalho sugerem que os recursos e componentes virtuais estabelecidos na Janela de Parametrização permitem que o usuário realize de modo intuitivo a adequada parametrização de valores e condições, a fim de auxiliar o dimensionamento de trilhas em placas de circuito impresso, as quais são aplicadas, principalmente, em sistemas eletrônicos de potência.

Os recursos previstos na interface permitem: i) dimensionar trilhas com corrente elétrica menor, igual ou superior a 35 A; ii) utilizar diversos tipos de materiais, além dos previamente definidos; iii) prever diferentes condições de acabamento superficial de vias; iv) considerar as características ambientais, e v) características do fluido em contato com o material condutor.

A variação nos resultados obtidos com a utilização da norma técnica IPC 2221 em relação à Interface Gráfica (IG) é justificada pelo fato dessa norma considerar condições padronizadas na definição dos termos contidos na expressão numérica que a representa, tais como: temperatura, pressão, umidade, entre outras.

O leiaute, a expressividade e os detalhes contidos nos componentes virtuais que foram elaborados para as janelas da Interface Gráfica (IG), contida na arquitetura do protótipo, proporcionam ambiente intuitivo e estruturado para o usuário, sendo que essas condições minimizam eventuais equívocos e facilitam a utilização do sistema.

8. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, D. M. Segunda Lei da Termodinâmica. 2003. 194 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade do Porto, Porto, 2003.
- ANTONIETTI, A. Determinação do Coeficiente de Transferência de Calor Numa Placa Plana Aquecida no Interior de Um Túnel de Vento Com Escoamento de A Em Paralelo. *Perspectiva*, Erechin, v. 35, n. 130, p.7-17, jun. 2011.
- AVELAR, A. C. Análise Teórica e Experimental da Transferência de Calor em Placas de Circuito Impresso Formando Canais Verticais Abertos. 1997. 110 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- BRUNETTI, F. *Mecânica dos Flúidos*. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2008.
- CAVALCANTI, E. J. C. Resfriamento por Convecção Natural de Placas de Circuito Impresso Formando um Canal Vertical. 1997. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Energia, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.
- CUNHA, A. P. Desenvolvimento Experimental e Simulação Numérica de Uma Réplica Térmica de Placa de Circuito Impresso. 2014. 125 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2014.
- GUSSOW, M. *Elettricidade Básica*. 2. ed. São Paulo: Makron Books, 1996. 639 p.



HALLIDAY, D. Fundamentos da física. 8. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

INCROPERA, F. P. & LAVINE, A. S. Fundamentos da Transferência e de Calor e Massa. 7. ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2015. 666 p.

IPC 2221. Generic Standard on Printed Board Design. Association Connecting Electronics Industries. Northbrook: ipc, 2003. 124 p.

KREITH, F. & BOHN, M. S. Princípios de Transferência de Calor. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003. 623 p.

LUZ, D. A. Estudo da Compatibilidade Eletromagnética em Placa de Circuito Impresso de Centrais Telefônicas. 2012. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

MARTINS, M. J. G. Primeira Lei da Termodinâmica. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Química, Universidade da Beira Interior, Covilhã, 2013.

OLIVEIRA, M. Estudo da Convecção Forçada, Natural e Mista em Escoamentos Laminares e Turbulentos Utilizando o Método de Volumes Finitos. 2005. 146 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2005.

PASSOS, J. C. Os experimentos de Joule e a primeira lei da termodinâmica. Revista Brasileira de Ensino de Física, Florianópolis, v. 31, n. 3, p.36031-36038, 12 out. 2009.

PINTO, F. R. C. G. Desenvolvimento de um filtro ativo paralelo com CSI e controle de corrente no barramento CC. 2013. 161 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Eletrônica Industrial e Computadores, Universidade do Minho, Minho, 2013.

REZENDE, A. T. Análise Numérica da Bolha de Separação do Escoamento Turbulento sobre Placa Plana Fina Inclinada. 2009. 25 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Mecânica, Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

SCHELBLE, Y. F. Análise Térmica de Trocadores de Calor Tipo Circuito Impresso Via Abordagem de Meios Porosos. 2016. 162 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

SIQUEIRA, E. A Revolução da Microeletrônica faz 60 anos. Jornal Estado de São Paulo. São Paulo. 30 jun. 2008.

SONNTAG, R. E.; BORGNAKKE, C.; VAN WYLEN & GORDON J. Fundamentos da Termodinâmica. 6. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 2003. 577 p.