UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DINÂMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL I

Solução Numérica da Difusão de Calor 2D

Relatório do 2º Trabalho Computacional - Regime Permanente

Aluno: Romulo de Aguiar Beninca

1. Definição do Problema e Organização do Trabalho

O objetivo deste trabalho é desenvolver um código computacional para resolver a equação de difusão de calor bidimensional em regime permanente, utilizando o Método de Volumes Finitos (MVF). Conforme especificado na tarefa, o problema físico consiste em uma placa quadrada unitária onde a temperatura é prescrita na **face superior**, enquanto as demais faces são mantidas a $0^{\circ}C$.

Este relatório está organizado de maneira a apresentar a metodologia e os resultados de forma estruturada:

Seção 2 (Desenvolvimento Matemático): Detalha a discretização da equação governante, o tratamento das condições de contorno via volumes fictícios e a dedução da solução analítica por separação de variáveis.

Seção 3 (Correspondência Algébrica): Relaciona as equações matemáticas deduzidas com a lógica de programação implementada.

Seção 4 (Resultados): Apresenta a simulação interativa, gráficos de convergência, perfis de temperatura comparativos, mapas de calor e cálculos de integrais (temperatura média e fluxos de calor).

Seção 5 (Listagem do Programa): Disponibiliza o código fonte completo em JavaScript utilizado para a solução do problema.

ITENS SOLICITADOS NA ESPECIFICAÇÃO

- **Item 1:** Número de iterações e gráfico da variação de $T(1/2, 1/2)$ (escala log/decimal).
- **Item 2:** Tabela com solução analítica, numérica e erro para o perfil vertical em $X = 1/2$.
- **Item 3:** Gráfico de Y versus T para $X = 1/2$ (Perfil Vertical).
- **Item 4:** Tabela com solução analítica, numérica e erro para o perfil horizontal em $Y = 1/2$.
- **Item 5:** Gráfico de T versus X para $Y = 1/2$ (Perfil Horizontal).
- **Item 6:** Temperatura média da placa (Analítica vs Numérica).
- **Item 7:** Taxa de transferência de calor no contorno leste (Analítica vs Numérica).
- **Item 8:** Taxa de transferência de calor no contorno norte (Analítica vs Numérica).
- **Item 9:** Listagem impressa do programa computacional implementado.

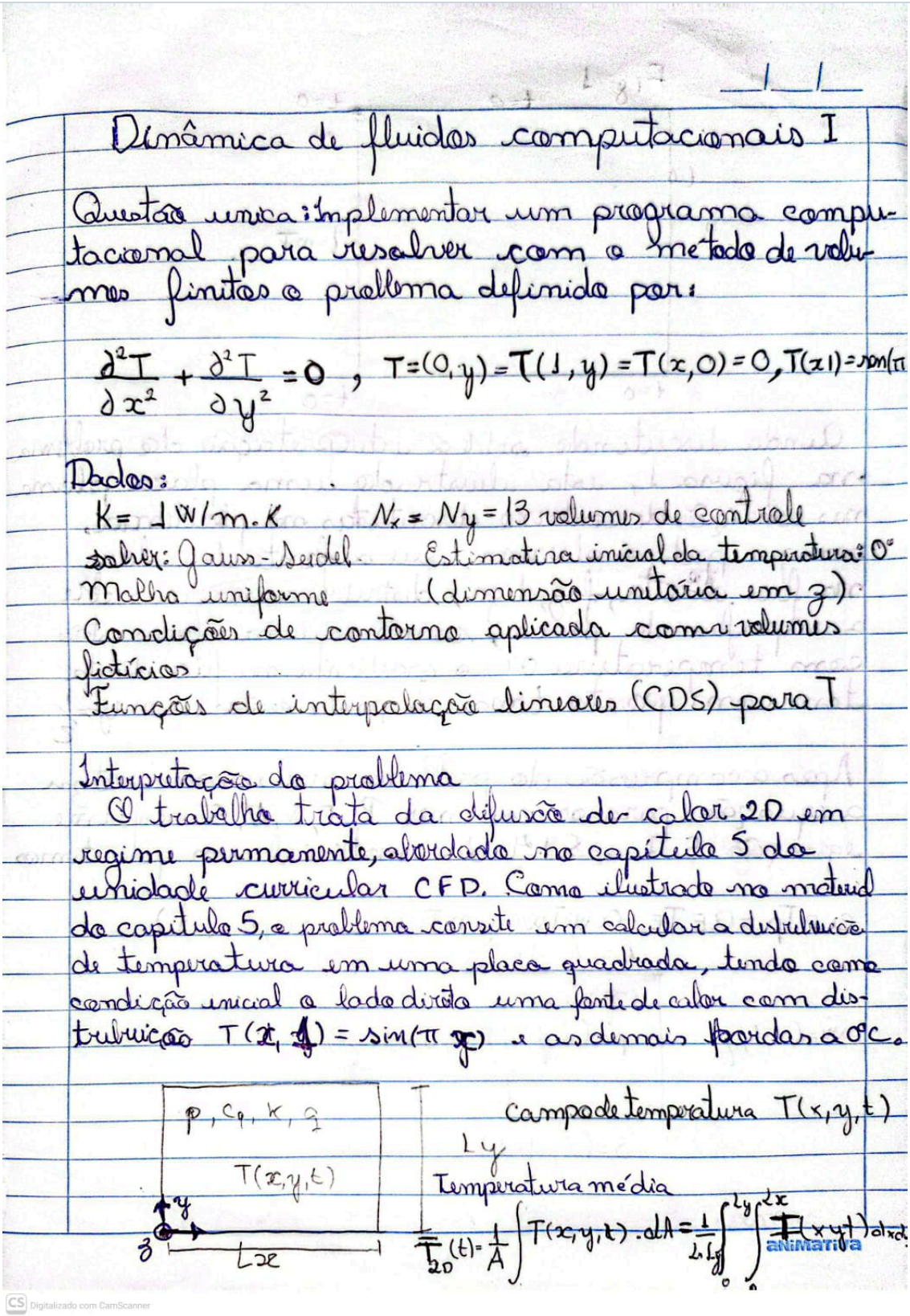


Figura 1: Definição dos parâmetros de malha ($N = 13$) e equações iniciais.

2. Desenvolvimento Matemático (Dedução)

2.1. Interpretação Física e Malha

A discretização espacial é realizada dividindo o domínio em volumes de controle. O comportamento esperado é um fluxo de calor partindo da região de maior temperatura (fonte senoidal) em direção às regiões mais frias ($0^{\circ}C$).

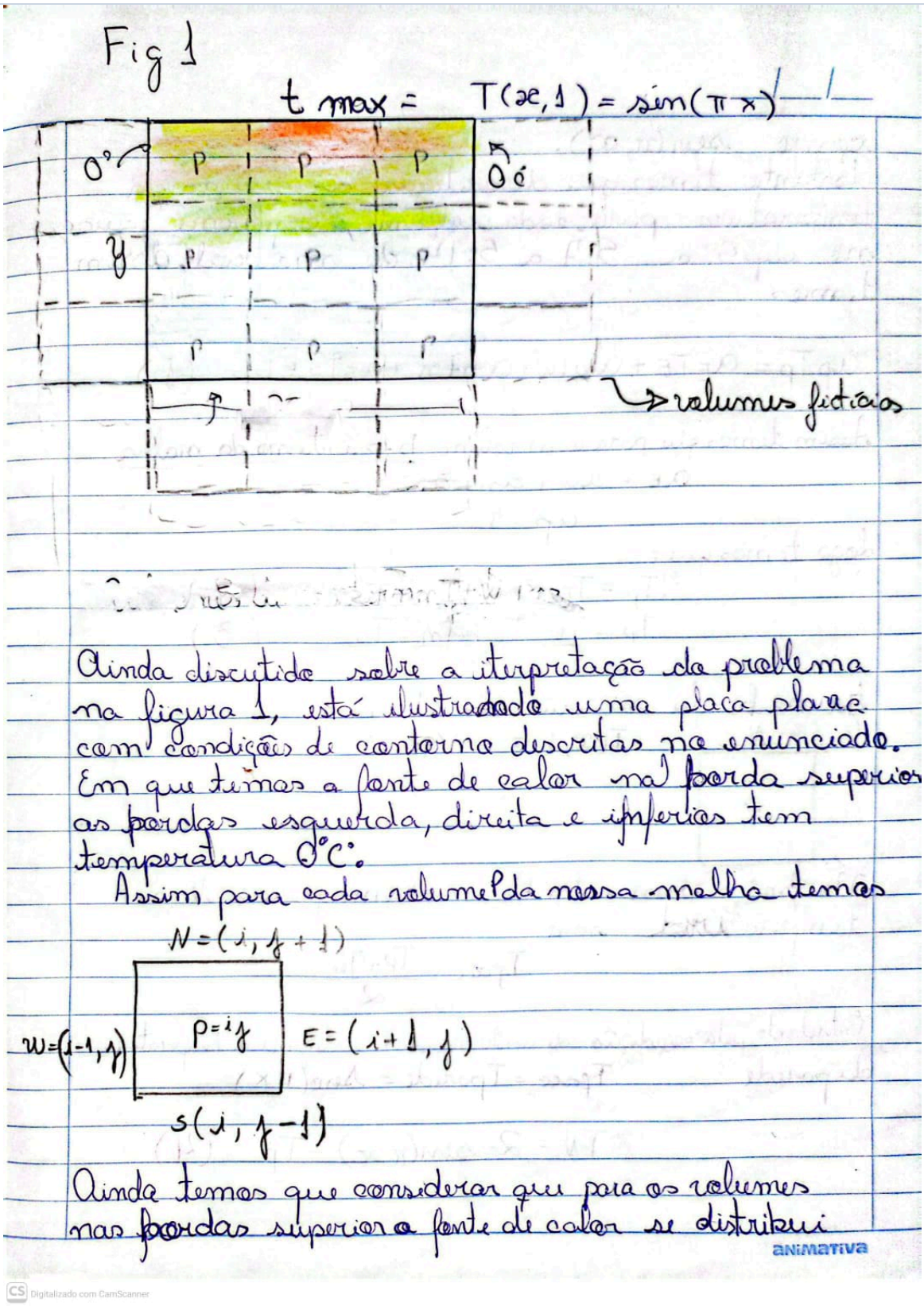


Figura 2: Interpretação física e esquema da malha com nomenclatura dos pontos cardeais (P, N, S, E, W).

2.2. Discretização para Volumes Internos

Para os volumes de controle internos, onde não há contato direto com as bordas prescritas, aplicamos o balanço de energia considerando condutividade constante e malha uniforme ($\Delta x = \Delta y$). Isso resulta na simplificação onde a soma dos coeficientes vizinhos é igual ao coeficiente central.

como $sen(\pi, x)$.

Portanto temos que discretizar a equação da temperatura para cada volume, conforme equação no cap 5 a 5.7 a 5.14 do material, assim temos

$$a_p T_p = a_E T_E + a_W T_W + a_n t_n + a_s T_S + b_p \quad (1)$$

Assim temos que para um volum b-p interno da malha

$$a_E = a_W + a_n + a_s$$

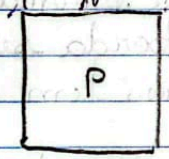
$$a_p = 4$$

Logo temos que:

$$4T_p = T_E + T_W + T_n + T_S \quad (2)$$

$$T_p = \frac{T_E + T_W + T_n + T_S}{4} \quad (3)$$

Já na borda superior temos $T(x, 1) = sen(\pi x)$



Na face superior entre P e o volume fictício N a temperatura será

$$T_{face} = \frac{T_P + T_N}{2}$$

Entretanto pela condição de contorno deve ser igual a temperatura da parede $T_{face} = T_{parede} = sen(\pi x)$

$$T_N = 2\,sin(\pi x) - T_P \quad (4)$$

Figura 3: Dedução da equação para nós internos, resultando na média aritmética dos 4 vizinhos.

2.3. Tratamento da Condição de Contorno

Para tratar a condição de contorno prescrita (fonte de calor), utiliza-se a técnica de volumes fictícios

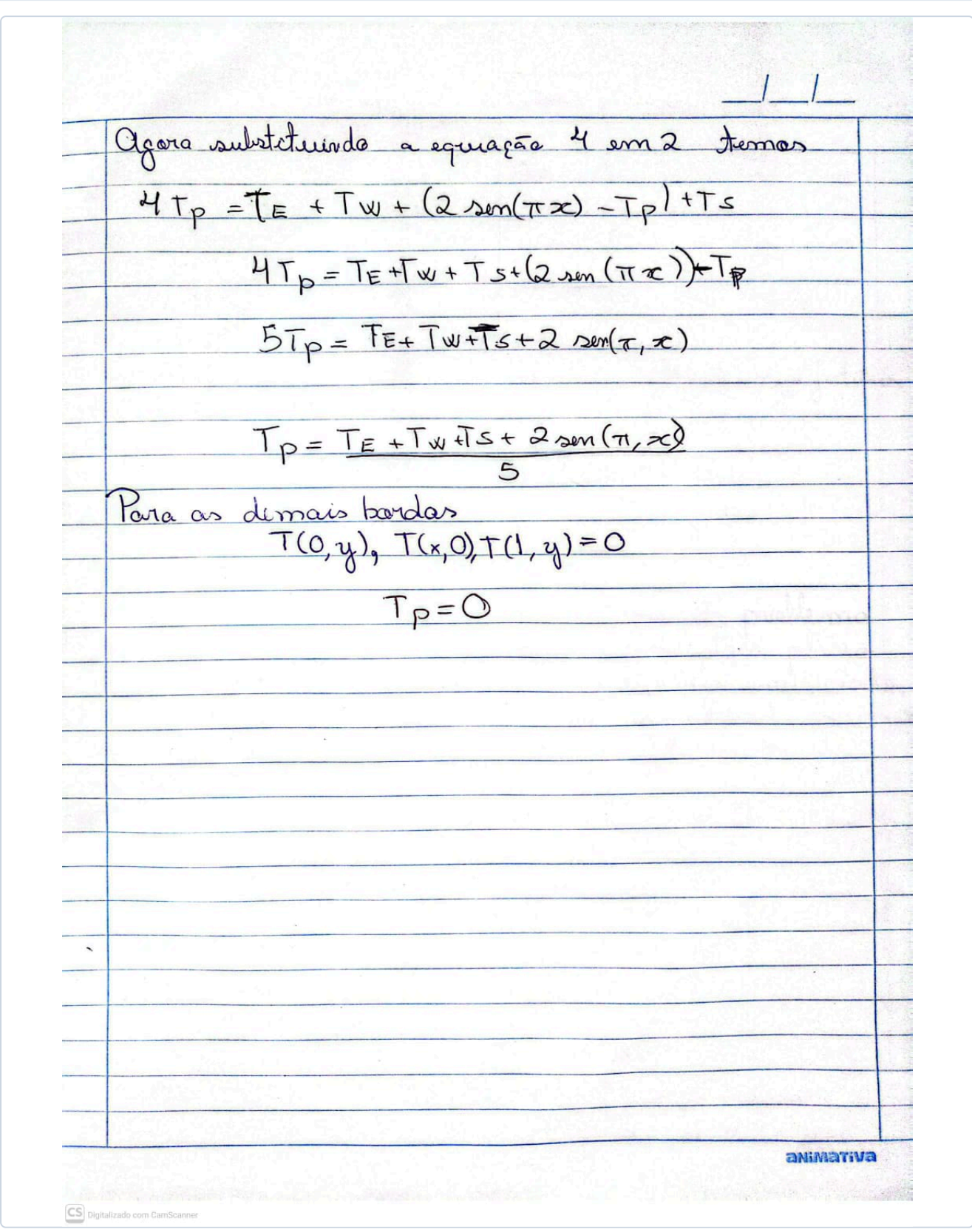


Figura 4: Dedução do coeficiente modificado (divisor 5) utilizando volumes fictícios (Adaptação para o problema atual).

2.4. Resumo do Algoritmo (Gauss-Seidel)

Para a solução do sistema de equações algébricas, optou-se pelo método iterativo de Gauss-Seidel. O algoritmo varre a malha atualizando a temperatura T_P com base nos valores mais recentes dos vizinhos.

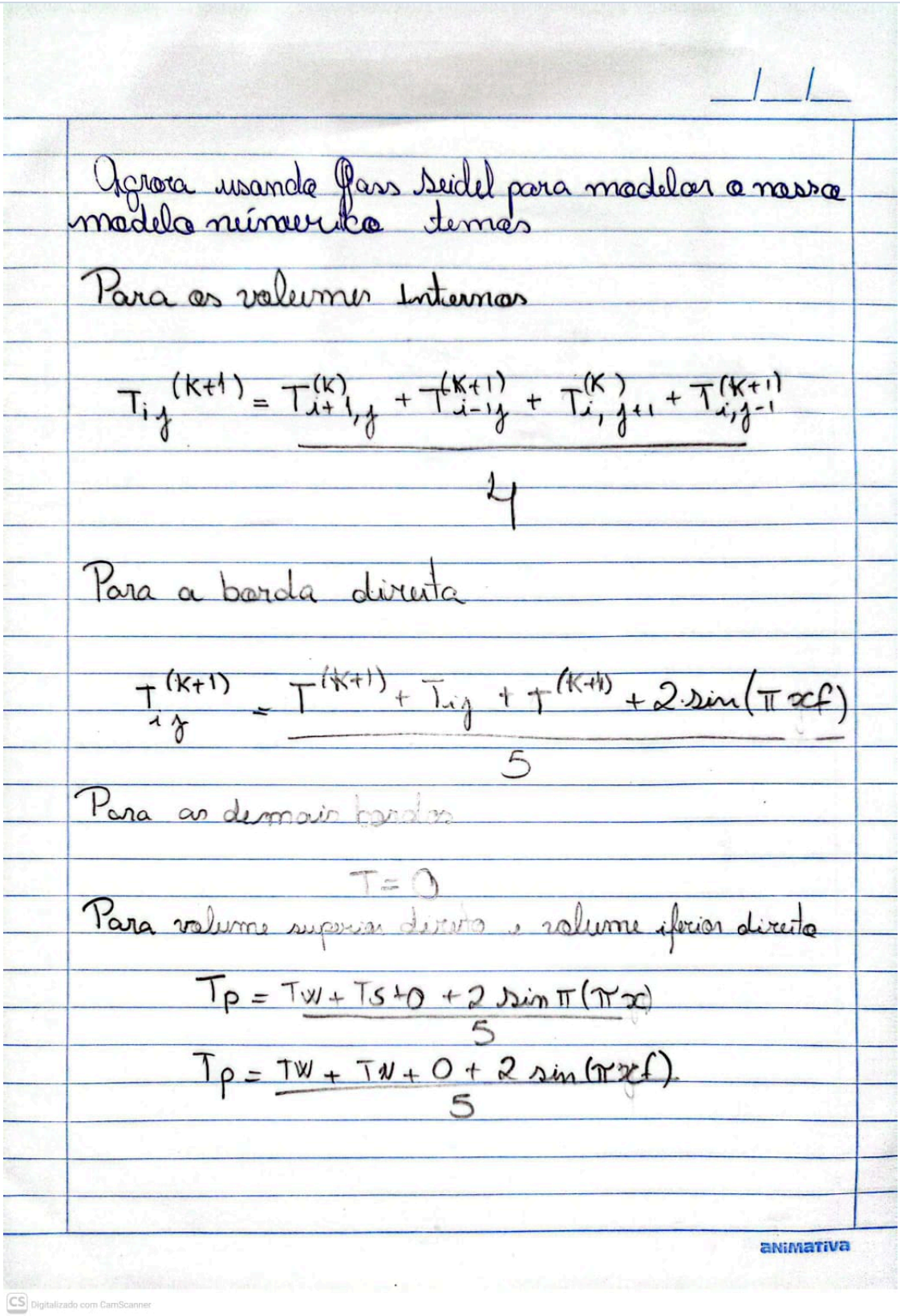
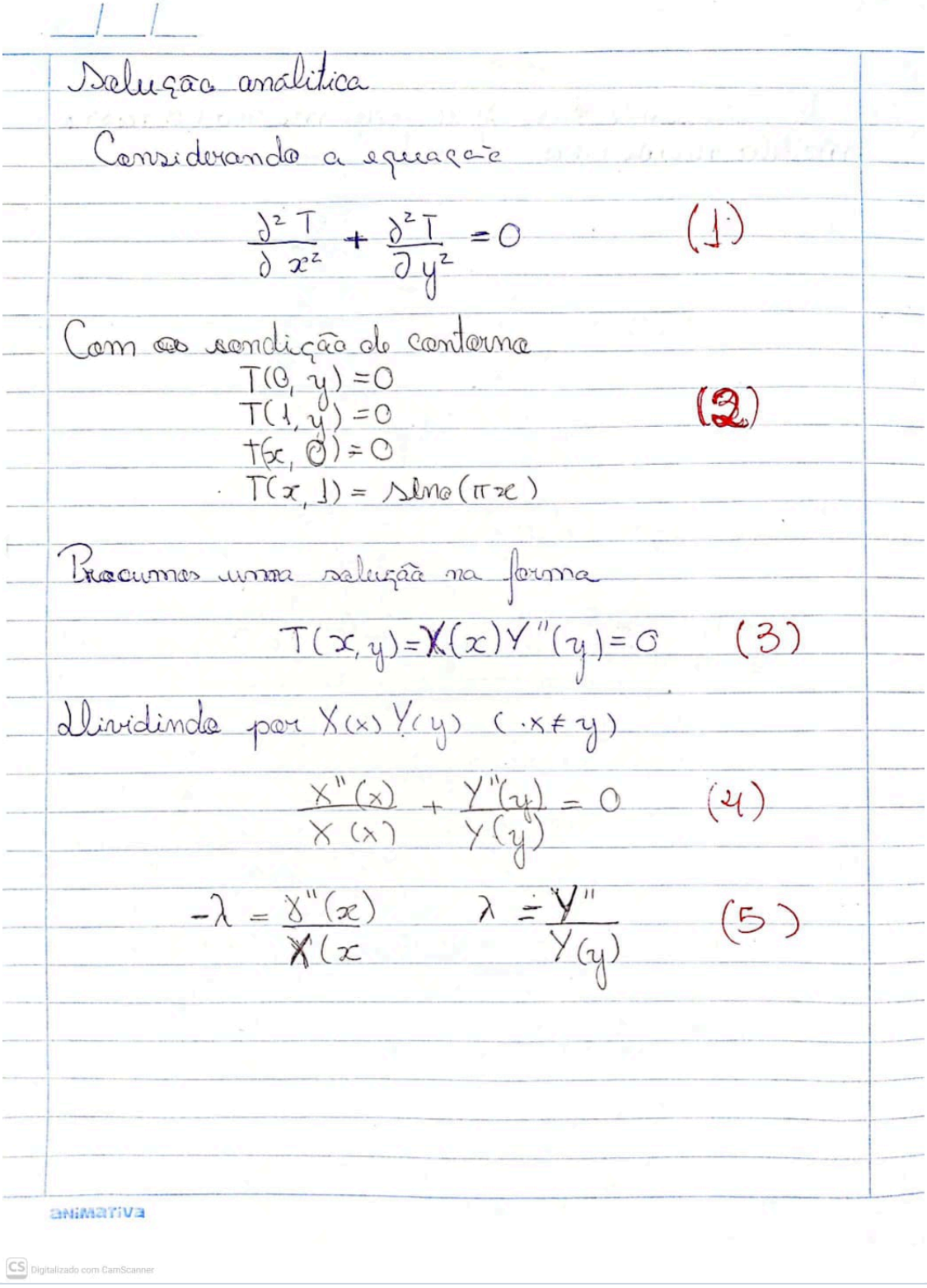


Figura 5: Resumo das equações iterativas implementadas no código para varredura do domínio.

2.5. Solução Analític

Para fins de validação dos resultados numéricos, deduziu-se a solução exata da equação nas condições de contorno apresentadas. O método utilizado foi a Separação de Variáveis, assumindo que $T(x, y) = X(x)Y(y)$.

O processo inicia-se dividindo a EDP em duas EDOs e aplicando as condições homogêneas nas bordas $x = 0$, $x = 1$ e $y = 0$.



Solução analítica

Considerando a equação

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = 0 \qquad (1)$$

Com as condição de contorno

$$T(0, y) = 0$$
$$T(1, y) = 0 \qquad (2)$$
$$T(x, 0) = 0$$
$$T(x, 1) = \sin(\pi x)$$

Procuramos uma solução na forma

$$T(x, y) = X(x)Y''(y) = 0 \qquad (3)$$

Dividindo por $X(x)Y(y)$ $(x \neq y)$

$$\frac{X''(x)}{X(x)} + \frac{Y''(y)}{Y(y)} = 0 \qquad (4)$$

$$-\lambda = \frac{X''(x)}{X(x)} \qquad \lambda = \frac{Y''}{Y(y)} \qquad (5)$$

ANIMATIVA

Figura 6: Início da dedução analítica: separação de variáveis e aplicação das condições de contorno homogêneas.

Em seguida, determina-se os autovalores λ_n e as autofunções associadas para $X(x)$ e $Y(y)$, resultando em uma solução na forma de série infinita.

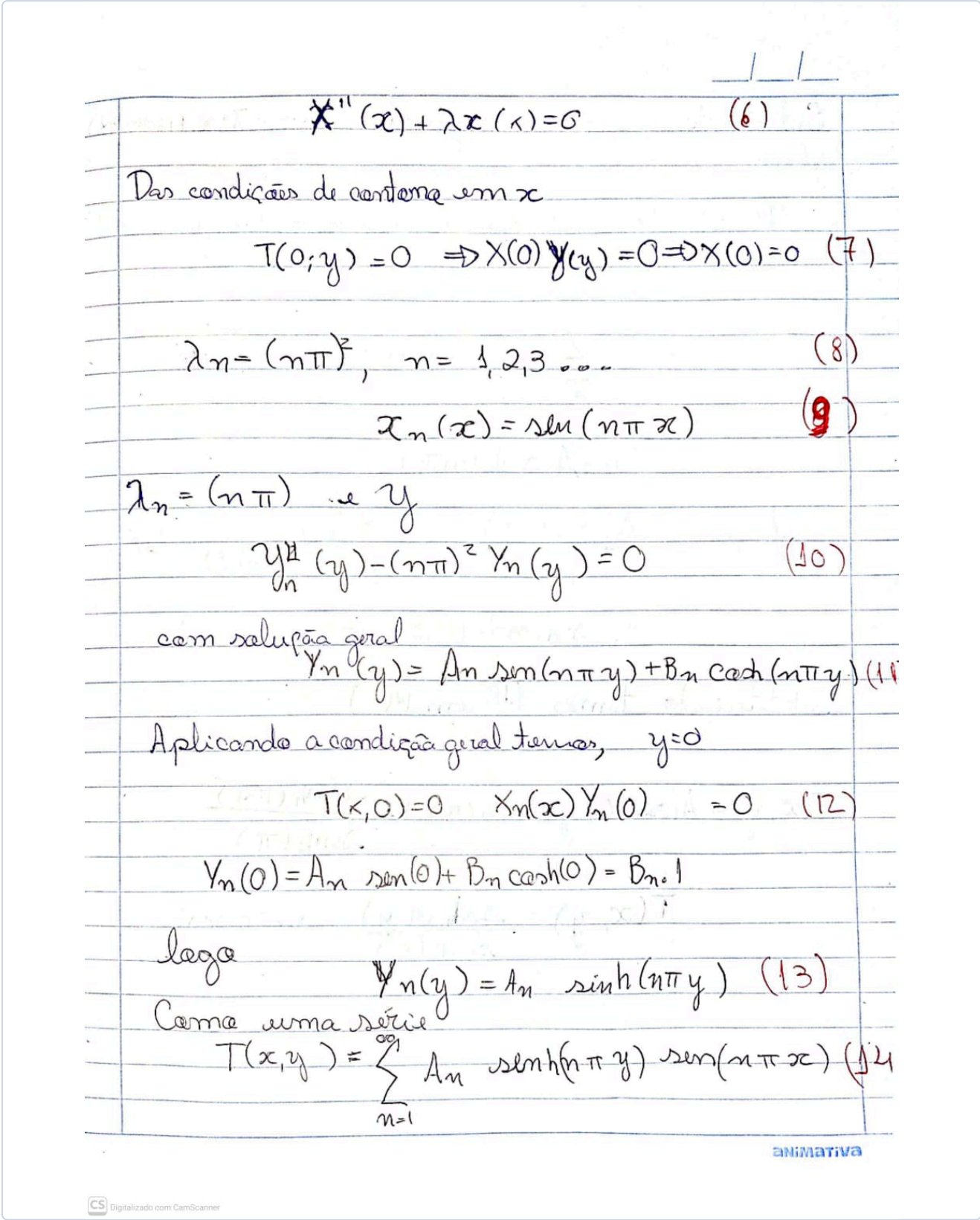


Figura 7: Determinação dos autovalores e da solução geral em série.

Por fim, aplica-se a condição de contorno não-homogênea na face superior ($T(x,1) = \text{sen}(\pi x)$) para encontrar os coeficientes da série. Devido à natureza da função seno, a série colapsa em um único termo (modo fundamental $n = 1$).

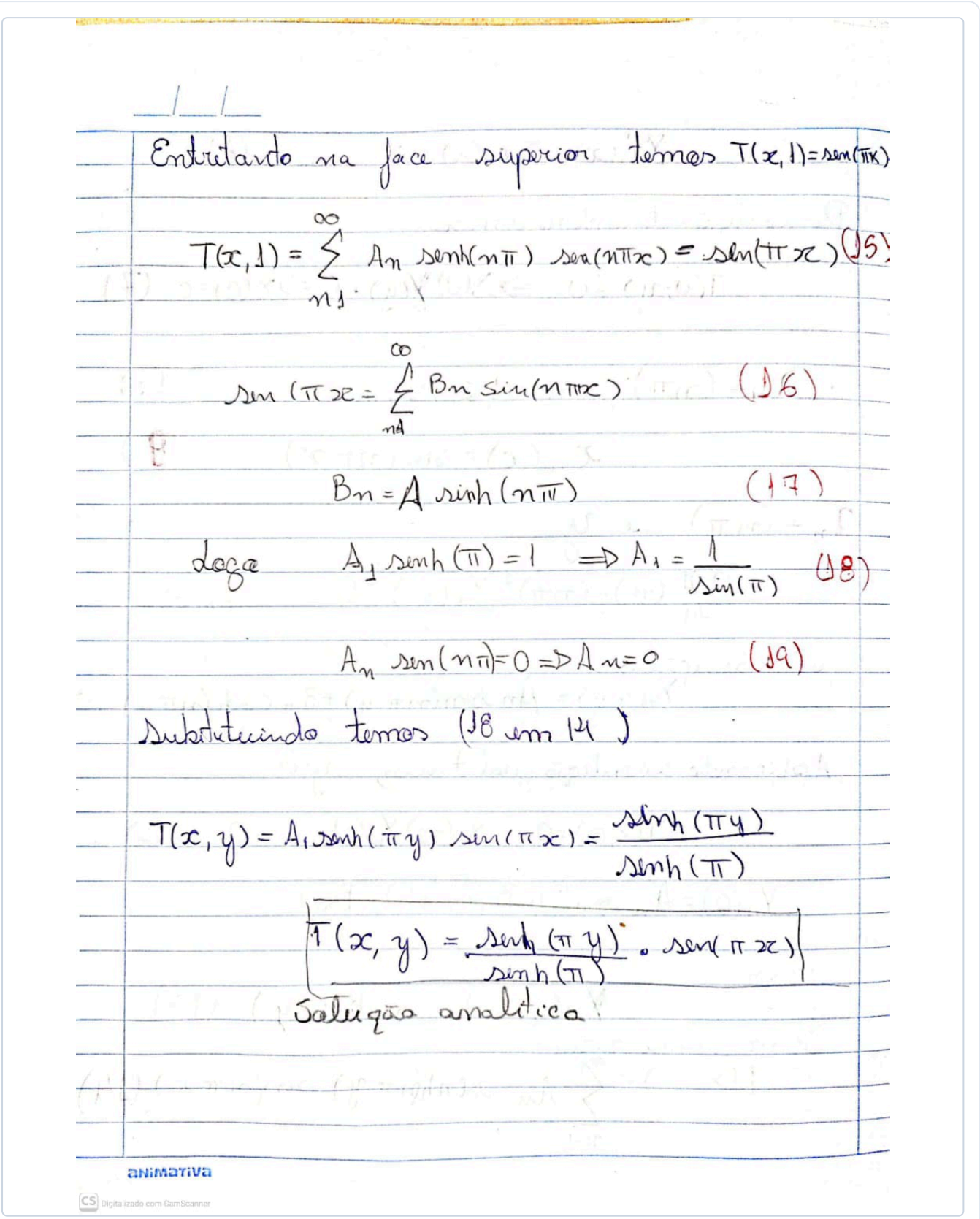


Figura 8: Aplicação da condição da face superior e obtenção da equação final fechada.

3. Correspondência Algébrica vs. Implementação

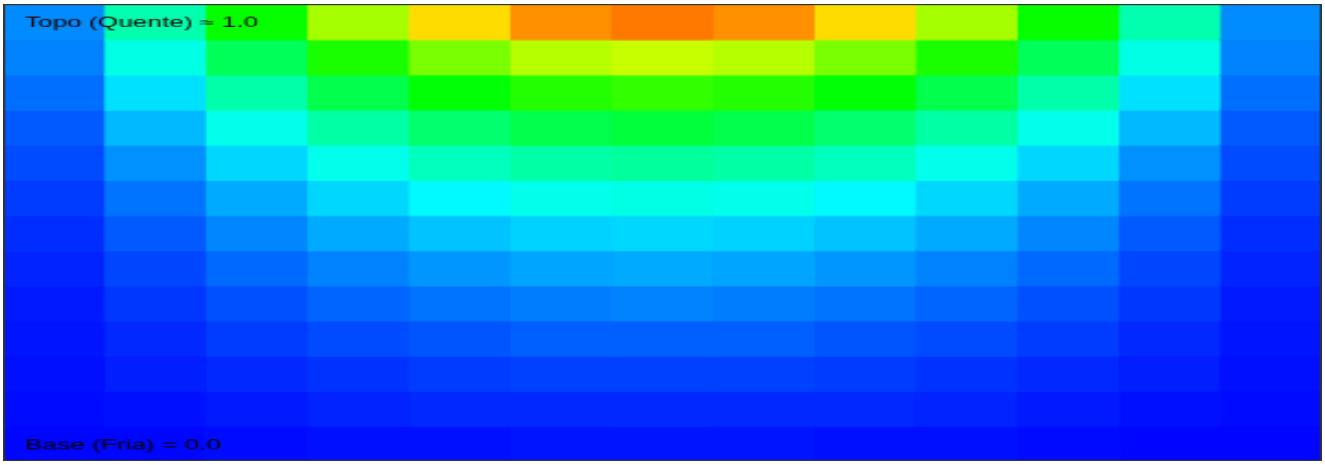
A implementação utiliza JavaScript puro. A tabela abaixo relaciona as equações deduzidas com a lógica de código utilizada no loop iterativo:

Tipo de Volume	Expressão Algébrica (Dedução)	Lógica no Código (JS)
Interno (Longe da borda superior)	$T_P^{(k+1)} = \frac{T_E^{(k)} + T_W^{(k+1)} + T_N^{(k)} + T_S^{(k+1)}}{4}$	`T[i][j] = (T[i+1][j] + T[i-1][j] + T[i][j+1] + T[i][j-1]) / 4.0`
Borda Superior ($j = Ny - 1$)	$T_P = \frac{T_E + T_W + T_S + 2\text{sen}(\pi x)}{5}$	`fonte = 2.0 * Math.sin(Math.PI * x)` `T[i][j] = (T[i+1][j] + T[i-1][j] + T[i][j-1] + fonte) / 5.0`

4. Resultados da Simulação

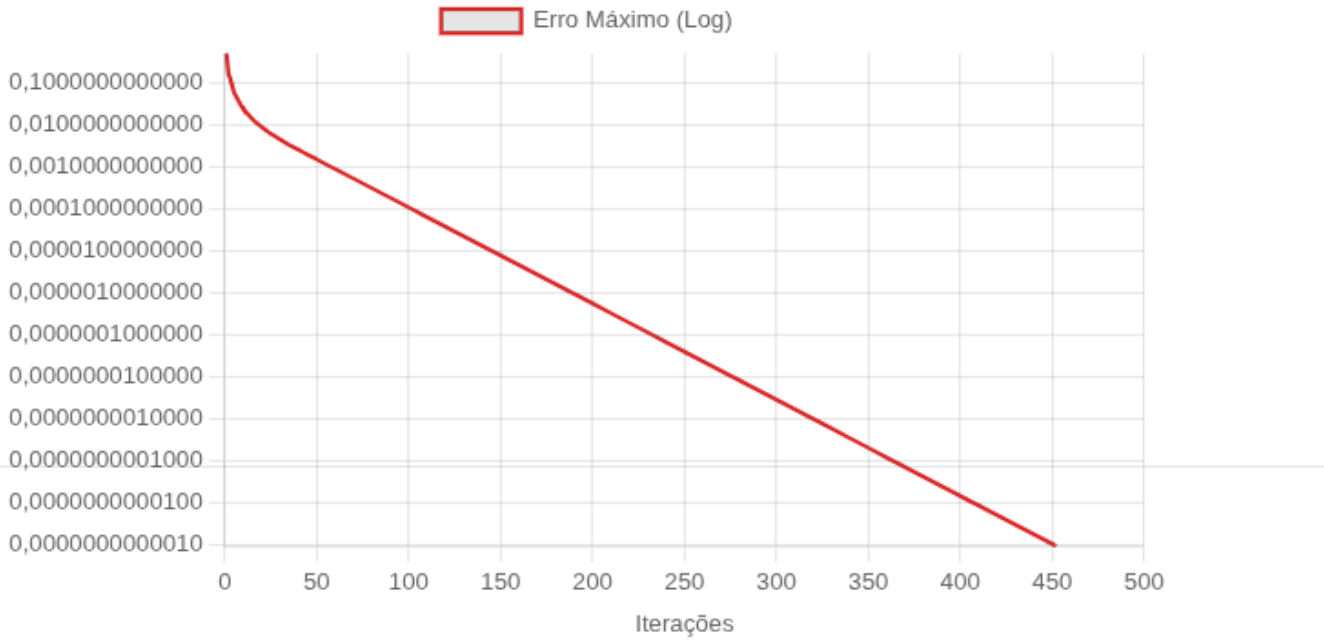
4.1. Campo de Temperatura (Visualização)

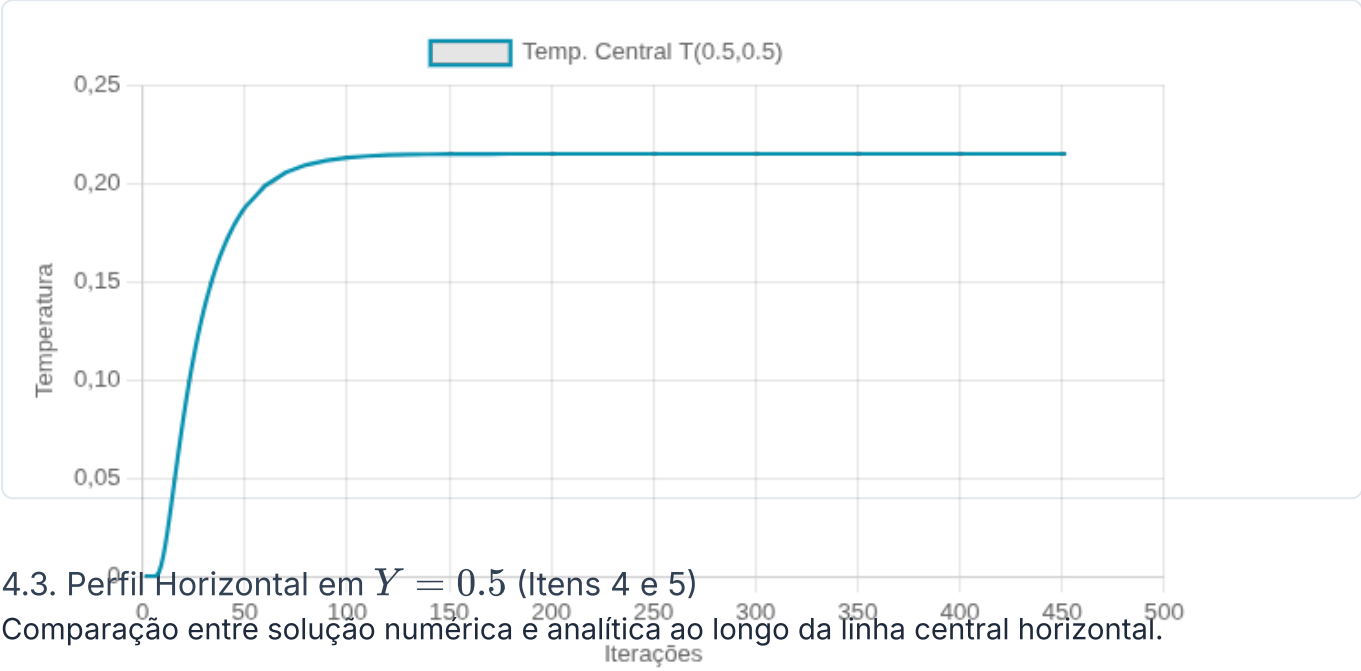
Distribuição de temperatura na placa. O gradiente parte da face superior (quente) para as demais faces (frias).



4.2. Convergência e Monitoramento (Item 1 do trabalho)

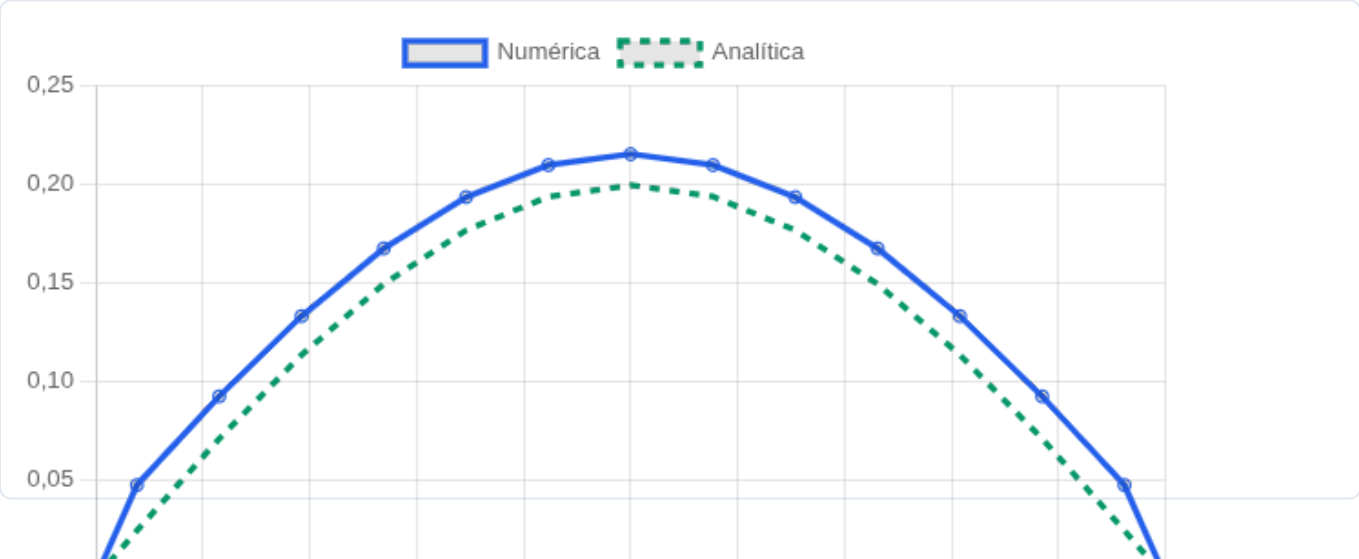
Variação da temperatura no ponto central $T(0.5, 0.5)$ e do erro máximo a cada iteração.





4.3. Perfil Horizontal em $Y = 0.5$ (Itens 4 e 5)

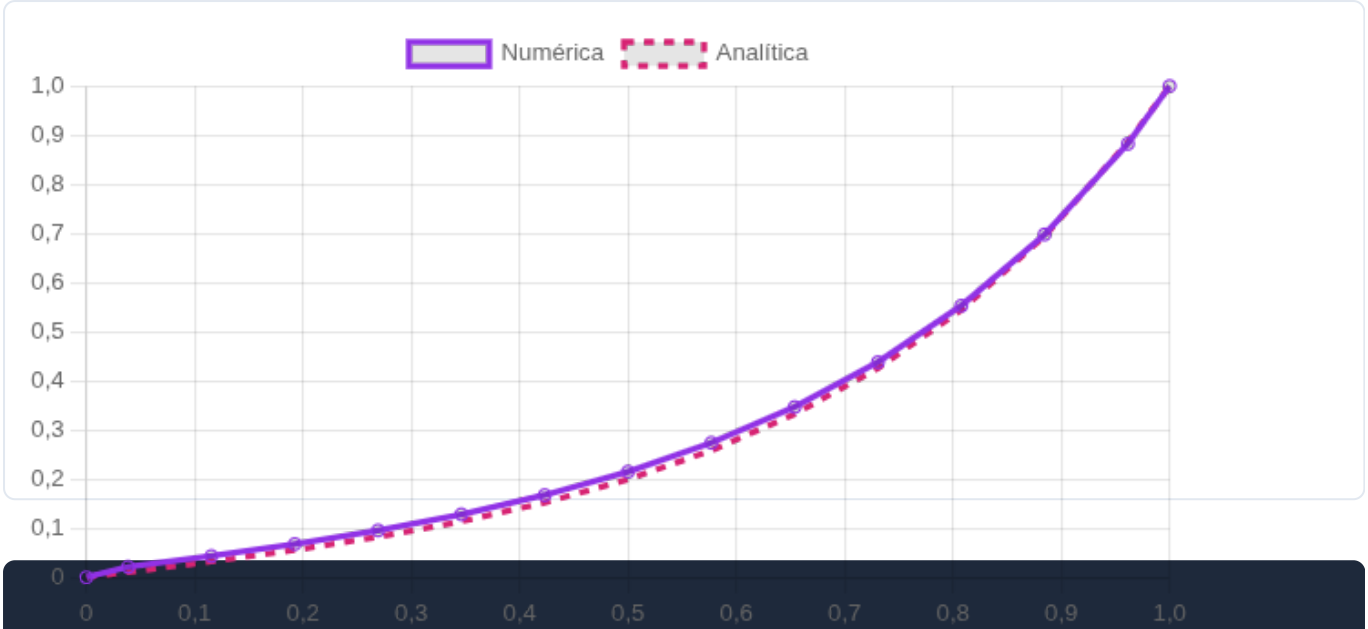
Comparação entre solução numérica e analítica ao longo da linha central horizontal.



i	x	Numérica	Analítica	Erro
BC	0.0000	0.000000	0.000000	0.00e+0
2	0.1154	0.092160	0.070662	2.15e-2

4.4. Perfil Vertical em $X = 0.5$ (Itens 2 e 3)

Comparação entre solução numérica e analítica ao longo da linha central vertical.



j	y	Numérica	Analítica	Erro
BC	0.0000	0.000000	0.000000	0.00e+0
2	0.1154	0.043344	0.032080	1.13e-2
4	0.2692	0.095540	0.082289	1.33e-2
6	0.4231	0.167326	0.152098	1.52e-2
8	0.5769	0.273751	0.258133	1.56e-2
10	0.7308	0.437972	0.425652	1.23e-2
12	0.8846	0.697919	0.694554	3.36e-3
BC	1.0000	1.000000	1.000000	0.00e+0

4.5. Médias e Taxas de Transferência (Itens 6, 7 e 8)

ITEM 6: TEMPERATURA MÉDIA DA PLACA

Numérica: **0.201298** °C | Analítica: **0.185854** °C | Erro: 1.54e-2

ITEM 7: TAXA DE CALOR NO CONTORNO LESTE (RESFRIADO)

Numérica: **1.542568** W/m | Analítica: **0.917152** W/m | Erro: 6.25e-1

ITEM 8: TAXA DE CALOR NO CONTORNO NORTE (FONTE)

Numérica: **-1.730053** W/m | Analítica: **-2.007484** W/m | Erro: 2.77e-1

5. Listagem do Programa (Item 9)

Código JavaScript completo utilizado para a simulação, traduzido e comentado.

```
(function() {
    // Variáveis globais para os gráficos (para poder destruir/recriar)
    let graficoConv = null, graficoCentro = null, graficoProfX = null, graficoProfY = null;

    // --- SOLUÇÃO ANALÍTICA (FONTE NO TOPO) ---
    // T(x,y) = sin(pi*x) * sinh(pi*y) / sinh(pi)
    function solucaoAnalitica(x, y) {
        return (Math.sin(Math.PI * x) * Math.sinh(Math.PI * y)) / Math.sinh(Math.PI);
    }

    // Média Analítica: Integral dupla de T(x,y) dx dy
    // Integral sin(pi*x) de 0 a 1 = 2/pi
    // Integral sinh(pi*y) de 0 a 1 = (cosh(pi)-1)/pi
    // Constante 1/sinh(pi)
    // Resultado: (2 * (cosh(pi) - 1)) / (pi^2 * sinh(pi))
    function mediaAnalitica() {
        return (2.0 * (Math.cosh(Math.PI) - 1.0)) / (Math.pow(Math.PI, 2) * Math.sinh(Math.PI
    }

    // Fluxo Leste (x=1): Integral de -k * dT/dx dy de 0 a 1
    // dT/dx = pi * cos(pi*x) * sinh(pi*y) / sinh(pi)
    // Em x=1: cos(pi) = -1. Logo dT/dx = -pi * sinh(pi*y)/sinh(pi)
    // Fluxo q'' = -k * (-pi * ...) = k * pi * sinh(pi*y)/sinh(pi)
    // Integral dy de sinh(pi*y) é (cosh(pi)-1)/pi
    // Integral Total = k * (cosh(pi)-1)/sinh(pi) = k * tanh(pi/2)
    function fluxoLesteAnalitico(k=1.0) {
        return k * Math.tanh(Math.PI / 2.0);
    }

    // Fluxo Norte (y=1): Integral de -k * dT/dy dx de 0 a 1
    // dT/dy = pi * sin(pi*x) * cosh(pi*y) / sinh(pi)
    // Em y=1: cosh(pi). Logo dT/dy = pi * sin(pi*x) * coth(pi)
    // Fluxo q'' = -k * pi * sin(pi*x) * coth(pi)
    // Integral dx de sin(pi*x) é 2/pi
    // Integral Total = -k * 2 * coth(pi)
    function fluxoNorteAnalitico(k=1.0) {
        return -k * 2.0 * (1.0 / Math.tanh(Math.PI));
    }

    // Função Principal chamada pelo botão na UI
    window.executarSimulacaoPeloUI = function() {
        // Obter valores dos inputs do HTML
        const Nx = parseInt(document.getElementById('entrada_Nx').value);
        const Ny = parseInt(document.getElementById('entrada_Ny').value);
        const maxIter = parseInt(document.getElementById('entrada_MaxIter').value);
        const tol = parseFloat(document.getElementById('entrada_Tol').value);

        // 1. Executar o Solver Numérico
        const resultado = executarSolver(Nx, Ny, maxIter, tol);

        // 2. Gerar Gráficos de Convergência (Item 1 do PDF)
        plotarConvergencia(resultado.histErro);
        plotarHistoricoCentro(resultado.histCentro);
```

```
        // 3. Gerar Perfis e Tabelas (Itens 2, 3, 4, 5 do PDF)
        gerarPerfilHorizontal(resultado.T, Nx, Ny);
        gerarPerfilVertical(resultado.T, Nx, Ny);

        // 4. Desenhar Mapa de Calor (Heatmap)
        desenharMapaCalor(resultado.T, Nx, Ny);

        // 5. Calcular Integrais e Fluxos (Itens 6, 7, 8 do PDF)
        calcularIntegrais(resultado.T, Nx, Ny);

        // 6. Exibir o próprio código fonte na página (Item 9 do PDF)
        document.getElementById('exibicao-codigo-fonte').textContent = document.getElementBy
    }

    // Solver Gauss-Seidel
    function executarSolver(Nx, Ny, maxIter, tol) {
        // Inicializar matriz T com zeros
        let T = Array(Nx).fill(0).map(()⇒Array(Ny).fill(0.0));
        let erroMax = 1.0, iteracao = 0;
        let histErro = [], histCentro = [];

        let meioX = Math.floor(Nx/2);
        let meioY = Math.floor(Ny/2);

        // Loop Iterativo
        while(iteracao < maxIter && erroMax > tol) {
            erroMax = 0.0;
            // Varredura da malha
            for(let i=0; i<Nx; i++) {
                for(let j=0; j<Ny; j++) {
                    let T_antigo = T[i][j];

                    // Vizinhos (Se fora do domínio, T=0, exceto topo que é tratado na eq)
                    let Tw = (i > 0) ? T[i-1][j] : 0.0;     // Oeste
                    let Te = (i < Nx-1) ? T[i+1][j] : 0.0;  // Leste
                    let Ts = (j > 0) ? T[i][j-1] : 0.0;     // Sul
                    let Tn = (j < Ny-1) ? T[i][j+1] : 0.0;  // Norte

                    let T_novo = 0;

                    // Condição de Contorno no Topo (j = Ny-1)
                    // Fonte: T(x,1) = sin(pi*x)
                    if(j === Ny-1) {
                        let x = (i + 0.5) / Nx;
                        let fonte = 2.0 * Math.sin(Math.PI * x);
                        // Eq. deduzida: (Tw + Te + Ts + fonte) / 5
                        // Nota: Tn é o vizinho fictício incorporado na fonte
                        T_novo = (Tw + Te + Ts + fonte) / 5.0;
                    } else {
                        // Volumes Internos
                        // Eq. deduzida: (Tw + Te + Tn + Ts) / 4
                        T_novo = (Tw + Te + Tn + Ts) / 4.0;
                    }

                    T[i][j] = T_novo; // Atualização Gauss-Seidel (imediata)

                    let erroLocal = Math.abs(T_novo - T_antigo);
                    if(erroLocal > erroMax) erroMax = erroLocal;
                }
```

```
            }
            iteracao++;

            // Salvar dados para os gráficos
            // Salva apenas a cada 10 iterações ou no final para performance
            if(iteracao < 50 || iteracao % 10 === 0 || erroMax <= tol) {
                histErro.push({x: iteracao, y: erroMax});
                histCentro.push({x: iteracao, y: T[meioX][meioY]});
            }
        }
        return {T, histErro, histCentro, iteracao};
    }

    // Cálculo das integrais (Média e Fluxos)
    function calcularIntegrais(T, Nx, Ny) {
        let dx = 1.0/Nx, dy = 1.0/Ny;
        let k = 1.0; // Condutividade térmica

        // --- Item 6: Temperatura Média (Regra do Retângulo) ---
        let somaT = 0;
        for(let i=0; i<Nx; i++) {
            for(let j=0; j<Ny; j++) {
                somaT += T[i][j];
            }
        }
        // Área total = 1.0 * 1.0 = 1.0
        let mediaNum = (somaT * dx * dy) / 1.0;
        let mediaAna = mediaAnalitica();
        let erroMedia = Math.abs(mediaNum - mediaAna);

        document.getElementById('res-media').innerHTML =
            `Numérica: <b>${mediaNum.toFixed(6)}</b> °C | Analítica: <b>${mediaAna.toFixed(6)

        // --- Item 7: Fluxo Leste (x=1) ---
        // Fronteira fria (T=0).
        // q'' = -k dT/dx. Usando UDS (Two-point backward): dT/dx ~ (T_parede - T_P) / (dx/2)
        // T_parede = 0. T_P = T[Nx-1][j]. Distância = dx/2.
        let fluxoLeste = 0;
        for(let j=0; j<Ny; j++) {
            let T_parede = 0.0;
            let T_P = T[Nx-1][j];
            let gradiente = (T_parede - T_P) / (dx/2.0);
            fluxoLeste += (-k * gradiente) * dy; // Integral de q'' dy
        }
        let flAna = fluxoLesteAnalitico();
        let errFL = Math.abs(fluxoLeste - flAna);

        document.getElementById('res-fluxo-leste').innerHTML =
            `Numérica: <b>${fluxoLeste.toFixed(6)}</b> W/m | Analítica: <b>${flAna.toFixed(6)

        // --- Item 8: Fluxo Norte (y=1) ---
        // Fronteira quente (T=sin(pi*x)).
        // q'' = -k dT/dy. Usando UDS: dT/dy ~ (T_parede - T_P) / (dy/2)
        // T_parede = sin(pi*x). T_P = T[i][Ny-1].
        let fluxoNorte = 0;
        for(let i=0; i<Nx; i++) {
            let x = (i + 0.5) * dx;
            let T_parede = Math.sin(Math.PI * x);
            let T_P = T[i][Ny-1];
            let gradiente = (T_parede - T_P) / (dy/2.0);
```

```
            fluxoNorte += (-k * gradiente) * dx; // Integral de q'' dx
        }
        let fnAna = fluxoNorteAnalitico();
        let errFN = Math.abs(fluxoNorte - fnAna);

        document.getElementById('res-fluxo-norte').innerHTML =
            `Numérica: <b>${fluxoNorte.toFixed(6)}</b> W/m | Analítica: <b>${fnAna.toFixed(6)
    }

    // Gerar Perfil Horizontal (T vs X)
    function gerarPerfilHorizontal(T, Nx, Ny) {
        let meioY = Math.floor(Ny/2);
        let coordY = (meioY + 0.5) / Ny;
        let htmlTabela = "<table style='width:100%'><thead><tr><th>i</th><th>x</th><th>Numéri
        let dadosNum = [], dadosAna = [];

        // Adicionar contorno esquerdo (x=0, T=0)
        htmlTabela += `<tr><td>BC</td><td>0.0000</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td><td>0.
        dadosNum.push({x:0, y:0}); dadosAna.push({x:0, y:0});

        for(let i=0; i<Nx; i++) {
            let x = (i + 0.5) / Nx;
            let valNum = T[i][meioY];
            let valAna = solucaoAnalitica(x, coordY);
            dadosNum.push({x:x, y:valNum}); dadosAna.push({x:x, y:valAna});
            htmlTabela += `<tr><td>${i+1}</td><td>${x.toFixed(4)}</td><td>${valNum.toFixed(6)
        }

        // Adicionar contorno direito (x=1, T=0)
        htmlTabela += `<tr><td>BC</td><td>1.0000</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td><td>0.
        dadosNum.push({x:1, y:0}); dadosAna.push({x:1, y:0});

        document.getElementById('saida-tabela-x').innerHTML = htmlTabela;

        const ctx = document.getElementById('graficoPerfilX').getContext('2d');
        if(graficoProfX) graficoProfX.destroy();
        graficoProfX = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: { datasets: [
                { label:'Numérica', data:dadosNum, borderColor:'#2563eb', pointRadius:3 },
                { label:'Analítica', data:dadosAna, borderColor:'#059669', borderDash:[5,5],
            ]},
            options: { responsive:true, maintainAspectRatio:false, scales:{x:{type:'linear',
        });
    }

    // Gerar Perfil Vertical (T vs Y)
    function gerarPerfilVertical(T, Nx, Ny) {
        let meioX = Math.floor(Nx/2);
        let coordX = (meioX + 0.5) / Nx;
        let htmlTabela = "<table style='width:100%'><thead><tr><th>j</th><th>y</th><th>Numéri
        let dadosNum = [], dadosAna = [];

        // Contorno Inferior (y=0, T=0)
        dadosNum.push({x:0, y:0}); dadosAna.push({x:0, y:0});
        htmlTabela += `<tr><td>BC</td><td>0.0000</td><td>0.000000</td><td>0.000000</td><td>0.

        for(let j=0; j<Ny; j++) {
            let y = (j + 0.5) / Ny;
            let valNum = T[meioX][j];
```

```
            let valAna = solucaoAnalitica(coordX, y);
            dadosNum.push({x:y, y:valNum}); dadosAna.push({x:y, y:valAna});
            htmlTabela += `<tr><td>${j+1}</td><td>${y.toFixed(4)}</td><td>${valNum.toFixed(6)
        }

        // Contorno Superior (y=1, T=sin(pi*x))
        let tParede = Math.sin(Math.PI * coordX);
        dadosNum.push({x:1, y:tParede}); dadosAna.push({x:1, y:tParede});
        htmlTabela += `<tr><td>BC</td><td>1.0000</td><td>${tParede.toFixed(6)}</td><td>${tPar

        document.getElementById('saida-tabela-y').innerHTML = htmlTabela;

        const ctx = document.getElementById('graficoPerfilY').getContext('2d');
        if(graficoProfY) graficoProfY.destroy();
        graficoProfY = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: { datasets: [
                { label:'Numérica', data:dadosNum, borderColor:'#9333ea', pointRadius:3 },
                { label:'Analítica', data:dadosAna, borderColor:'#db2777', borderDash:[5,5],
            ]},
            options: { responsive:true, maintainAspectRatio:false, scales:{x:{type:'linear',
        });
    }

    // Gráfico de Convergência do Erro
    function plotarConvergencia(dados) {
        const ctx = document.getElementById('graficoConvergencia').getContext('2d');
        if(graficoConv) graficoConv.destroy();
        graficoConv = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: { datasets: [{ label: 'Erro Máximo (Log)', data: dados, borderColor: '#dc26
            options: { responsive:true, maintainAspectRatio:false, scales:{ x:{type:'linear',
        });
    }

    // Gráfico do Histórico do Ponto Central
    function plotarHistoricoCentro(dados) {
        const ctx = document.getElementById('graficoPontoCentral').getContext('2d');
        if(graficoCentro) graficoCentro.destroy();
        graficoCentro = new Chart(ctx, {
            type: 'line',
            data: { datasets: [{ label: 'Temp. Central T(0.5,0.5)', data: dados, borderColor:
            options: { responsive:true, maintainAspectRatio:false, scales:{ x:{type:'linear',
        });
    }

    // Mapa de Calor (Heatmap)
    function desenharMapaCalor(T, Nx, Ny) {
        const c = document.getElementById('canvasMapaCalor');
        const ctx = c.getContext('2d');
        const w = c.parentElement.clientWidth;
        const h = c.parentElement.clientHeight;
        c.width = w; c.height = h;
        const cw = w/Nx, ch = h/Ny;

        for(let i=0; i<Nx; i++) {
            for(let j=0; j<Ny; j++) {
                let val = T[i][j];
                // Escala de cor: Azul (frio) → Vermelho (quente)
                // O máximo analítico é 1.0 (seno de pi/2 * sinh/sinh)
```

```
                let matiz = (1.0 - val) * 240;
                ctx.fillStyle = `hsl(${matiz}, 100%, 50%)`;
                // Inverter Y para desenhar de baixo para cima
                ctx.fillRect(i*cw, h - (j+1)*ch, cw+1, ch+1);
            }
        }
        // Borda
        ctx.strokeStyle = "#333"; ctx.lineWidth=2; ctx.strokeRect(0,0,w,h);

        // Legenda Simples
        ctx.fillStyle = "black"; ctx.font = "12px sans-serif";
        ctx.fillText("Topo (Quente) ≈ 1.0", 10, 20);
        ctx.fillText("Base (Fria) = 0.0", 10, h - 10);
    }

    // Executar automaticamente ao carregar a página
    setTimeout(window.executarSimulacaoPeloUI, 500);
})();
```