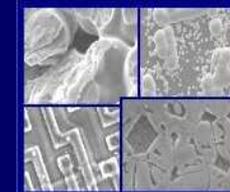




**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA  
DE MATERIAIS**

**Faculdade de Engenharia,  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química**



**PGETEMA**

# **DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS EM SILÍCIO CZ**

**Rita de Cássia da Costa**

Licenciada em Física

**Orientadora: Profa. Dra. Izete Zanenco**

**Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Moehlecke**

**Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Tecnologia de Materiais da PUCRS**

# SUMÁRIO

- 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS**
- 2. OBJETIVO**
- 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**
- 4. A CÉLULA SOLAR BIFACIAL**
- 5. DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS**
- 6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE OXIDAÇÃO E DIFUSÃO**
- 7. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA  $n^+pn^+$**
- 8. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS A E B**
- 9. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA  $n^+pp^+$  (PROCESSOS C)**
- 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C**

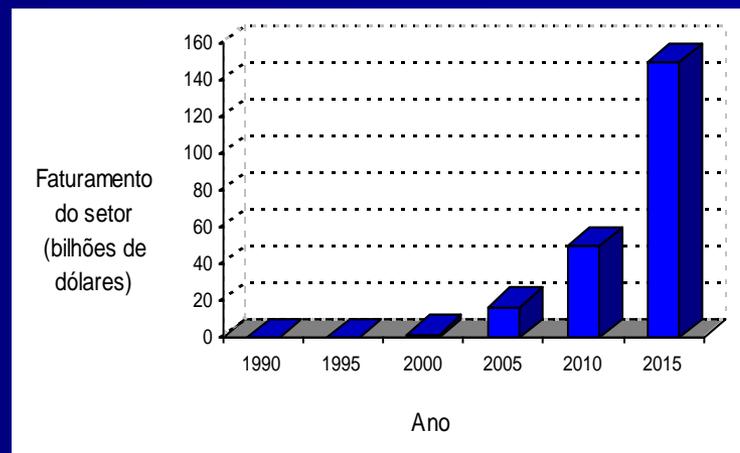
# SUMÁRIO

- 11. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA  $n^+pp^+$  (PROCESSOS D)**
- 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D**
- 13. ANÁLISE E CONCLUSÕES**
- 14. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE**

# 1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

## VANTAGENS DOS SISTEMAS FOTOVOLTAICOS

- Fonte renovável.
- Modular.
- Baixos custos de manutenção.
- Vida útil longa.
- De grande importância para instalações em lugares desprovidos de rede elétrica.
- Matéria prima abundante no planeta.



## A EVOLUÇÃO DO MERCADO LIGADO À PRODUÇÃO DE MÓDULOS FOTOVOLTAICOS

## 2. OBJETIVO

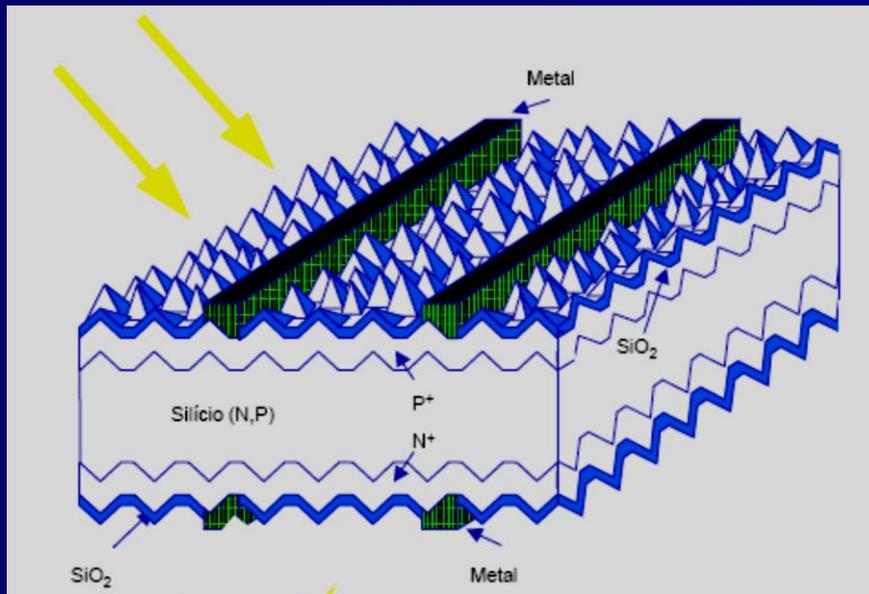
O objetivo deste trabalho centrou-se no desenvolvimento de processos para a fabricação de células solares bifaciais industriais, com metalização por serigrafia em lâminas de silício Czochralski (Si-Cz) do tipo p.

Foram desenvolvidos dispositivos com as estruturas  $n^+pn^+$  e  $n^+pp^+$ .

### 3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Desenvolvimento de células solares  $n^+pn^+$  com e sem campo retrodifusor seletivo de Al.
- Análise da influência do filme antirreflexo na metalização na face  $pn^+$ .
- Desenvolvimento de células solares  $n^+pp^+$ , com difusão de boro por  $BBr_3$  a 1000 °C e 900 °C.
- Desenvolvimento de células solares  $n^+pp^+$ , com difusão de boro por deposição do dopante por *spin-on*.
- Análise da difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico.
- Análise da influência da espessura do dopante depositado por *spin-on*.

## 4. A CÉLULA SOLAR BIFACIAL



ESTRUTURA DE UMA CÉLULA  
SOLAR BIFACIAL

## **5. DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS**

### **5.1. Processos de Fabricação de Células Solares Bifaciais com Estrutura $n^+pn^+$ :**

- **Sem BSF de Al Seletivo – Processo A:**

  - A1 - Temperatura de queima da pasta**

  - A2 - Metalização antes do AR na posterior**

- **Com BSF de Al Seletivo – Processo B:**

  - B1 - Ag/Al e Ag na face posterior**

  - B2 - Al e Ag na face posterior**

  - B3 - AR frontal antes do BSF**

  - B4 - AR frontal após o BSF**

# 5. DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS

## 5.2. Processos de Fabricação de Células Solares Bifaciais com Estrutura $n^+pp^+$ :

### Formação da Região $p^+$ :

- $BBr_3$  - Processo C:

**C<sub>A</sub>**- Difusão de boro a 1000 °C.

**C<sub>B</sub>**- Difusão de boro a 900 °C.

- PBF20 - Processo D:

**D<sub>A</sub>**- Influência da oxidação na proteção do emissor.

**D<sub>B</sub>**- Difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico.

**D<sub>C</sub>**- Influência da espessura do dopante na eficiência da célula.

## 6. EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO PROCESSO DE OXIDAÇÃO E DIFUSÃO



**FORNOS  
CONVENCIONAIS**

**FORNO BRUCE**

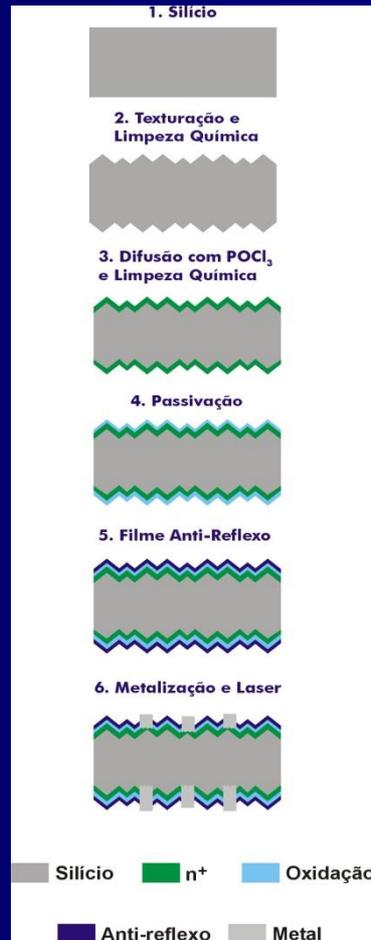


**FORNO TYSTAR**

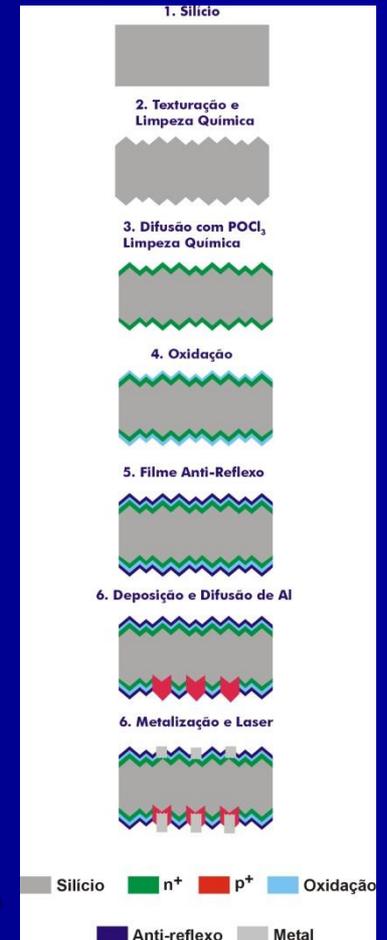


# 7. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pn^+$

## PROCESSO A

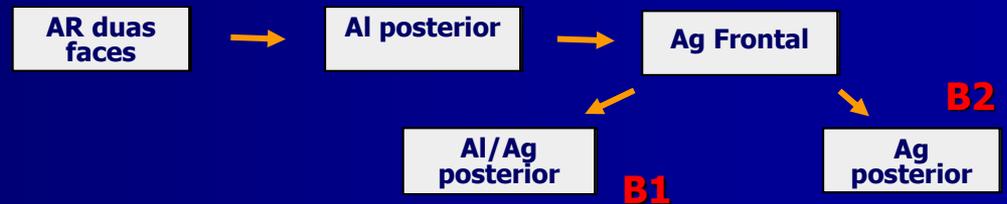


## PROCESSO B

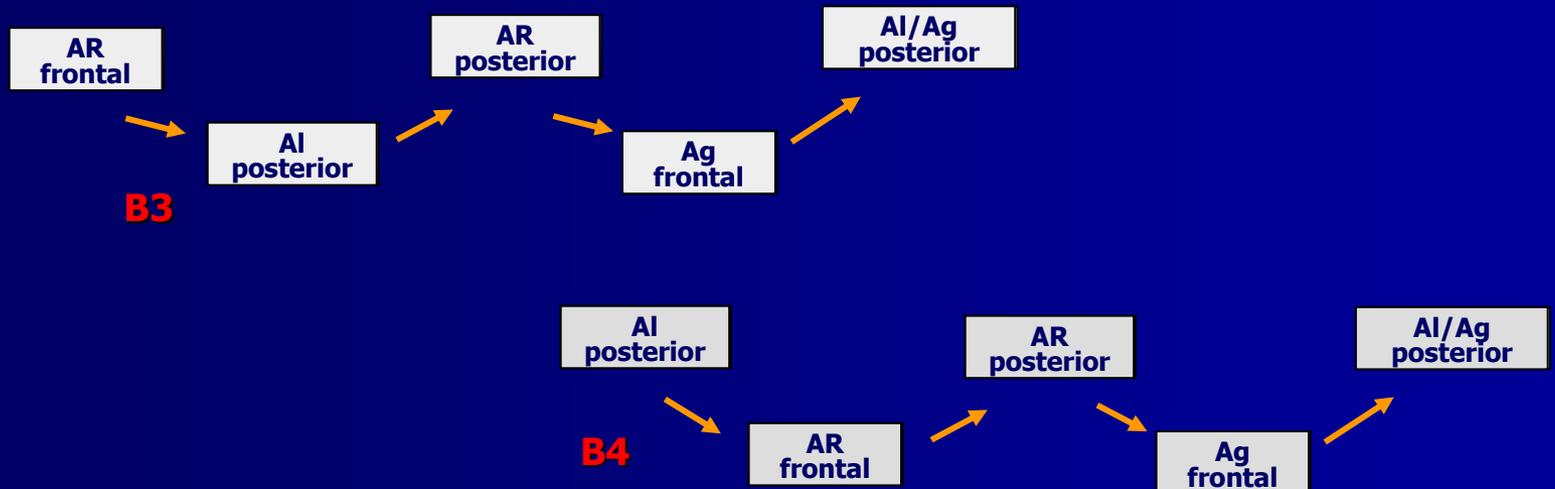


# 7. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pn^+$

## PROCESSOS B1 E B2



## PROCESSOS B3 E B4



# 8. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS A E B

## PROCESSOS A:

Valores Médios  
Processo **A1**

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	344 ± 18	30,3 ± 0,3	0,478 ± 0,015	5,0 ± 0,4
930	409 ± 11	28,1 ± 0,4	0,460 ± 0,020	5,3 ± 0,4
FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	239 ± 17	4,3 ± 0,1	0,49 ± 0,04	0,5 ± 0,1
930	277 ± 7	4,0 ± 0,1	0,48 ± 0,06	0,5 ± 0,1

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	391 ± 14	28 ± 3	0,496 ± 0,011	5,4 ± 0,9
FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	302 ± 26	3,7 ± 0,5	0,53 ± 0,05	0,6 ± 0,2

Valores Médios  
Processo **A2**

# 8. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS A E B

## PROCESSOS B:

Valores Médios  
Processo **B1** e **B2**

FACE FRONTAL				
Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
<b>B1</b>	220 ± 80	25 ± 5	0,31 ± 0,05	1,9 ± 1,1
<b>B2</b>	36 ± 9	10 ± 3	0,247 ± 0,009	0,12 ± 0,04

FACE POSTERIOR				
Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η(%)
<b>B1</b>	80 ± 40	3,3 ± 0,2	0,284 ± 0,027	0,1 ± 0,1
<b>B2</b>	11 ± 2	2,5 ± 0,5	0,242 ± 0,008	0,0

# 8. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS A E B

## PROCESSOS B:

Valores Médios  
Processo **B3**

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	506 ± 1	30,7 ± 0,1	0,720 ± 0,011	11,2 ± 0,1
900	517 ± 3	30,6 ± 0,2	0,712 ± 0,005	11,3 ± 0,2
FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	449 ± 11	4,0 ± 0,0	0,719 ± 0,008	1,2 ± 0,1
900	454 ± 5	3,5 ± 0,1	0,712 ± 0,003	1,2 ± 0,1

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	516 ± 4	31,0 ± 0,1	0,706 ± 0,009	11,3 ± 0,2
900	512 ± 4	30,7 ± 0,2	0,658 ± 0,022	10,4 ± 0,4
FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
880	454 ± 3	3,5 ± 0,1	0,706 ± 0,003	1,1 ± 0,1
900	448 ± 7	3,5 ± 0,0	0,690 ± 0,017	1,1 ± 0,0

Valores Médios  
Processo **B4**

# 9. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pp^+$

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo **CA** - Difusão de boro a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$

**CA1**- Influência da concentração de boro

**CA2**- Ordem das difusões

**CA3**- Temperatura de difusão de  $POCl_3$

Processo **CB** - Difusão de boro a  $900\text{ }^\circ\text{C}$

**CB1**- Concentração de boro  $0,07\%$

**CB2**- Concentração de boro  $0,1\%$

**CB3**- Concentração de boro  $0,15\%$



# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: BBr<sub>3</sub>

Processo CA - Difusão de boro a 1000 °C

CA1- Influência da concentração de boro

FACE FRONTAL					
BBr <sub>3</sub> (%)	Células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
0,07	A1-29/07/08	570	29,3	0,728	12,2
	A2-29/07/08	537	30,2	0,526	8,5
	Média	554 ± 16	29,8 ± 0,9	0,63 ± 0,10	10,4 ± 1,8
0,1	A1-14/08/08	551	27,0	0,721	10,7
	A2-14/08/08	541	29,0	0,709	11,1
	Média	546 ± 5	28 ± 1,0	0,715 ± 0,006	10,9 ± 0,2
FACE POSTERIOR					
0,07	A1-29/07/08	550	12,9	0,756	5,4
	A2-29/07/08	476	3,7	0,617	1,1
	Média	510 ± 40	8 ± 5	0,69 ± 0,07	3,3 ± 2,1
0,1	A1-14/08/08	530	11,0	0,746	4,4
	A2-14/08/08	516	10,1	0,743	3,9
	Média	523 ± 7	10,6 ± 0,4	0,745 ± 0,001	4,2 ± 0,2

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo **CA** - Difusão de boro a 1000 °C

**CA2** - Ordem das difusões

FACE FRONTAL				
Difusão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
1° boro	554 ± 17	29,8 ± 0,5	0,630 ± 0,10	10,4 ± 1,9
1° Fósforo	535 ± 20	22,9 ± 1,2	0,705 ± 0,007	8,6 ± 0,7
FACE POSTERIOR				
Difusão	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
1° boro	510 ± 40	8 ± 5	0,687 ± 0,07	3,3 ± 2,2
1° Fósforo	520 ± 40	12 ± 10	0,733 ± 0,018	5 ± 4

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $\text{BBr}_3$

Processo **CA** - Difusão de boro a  $1000\text{ }^\circ\text{C}$

**CA3** - Temperatura de difusão de  $\text{POCl}_3$

FACE FRONTAL				
$T_D$ ( $^\circ\text{C}$ )	Voc (mV)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF	$\eta$ (%)
875	$541 \pm 2$	$30,4 \pm 0,2$	$0,609 \pm 0,024$	$10,0 \pm 0,4$
900	$546 \pm 5$	$28,0 \pm 1,0$	$0,715 \pm 0,006$	$10,9 \pm 0,2$
FACE POSTERIOR				
$T_D$ ( $^\circ\text{C}$ )	Voc (mV)	Jsc ( $\text{mA}/\text{cm}^2$ )	FF	$\eta$ (%)
875	$510 \pm 7$	$8,4 \pm 1,5$	$0,721 \pm 0,006$	$3,1 \pm 0,6$
900	$523 \pm 7$	$10,6 \pm 0,4$	$0,745 \pm 0,001$	$4,2 \pm 0,3$

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo **C<sub>B</sub>** - Difusão de boro a 900 °C

**C<sub>B1</sub>** - Concentração de boro 0,07 %

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	557 ± 3	32,4 ± 0,7	0,615 ± 0,024	11,1 ± 0,4
880	548 ± 1	32,5 ± 0,2	0,602 ± 0,006	10,7 ± 0,1
890	545 ± 2	31,7 ± 0,2	0,603 ± 0,012	10,4 ± 0,3

FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	544 ± 6	19,1 ± 1,4	0,660 ± 0,027	6,9 ± 0,7
880	533 ± 1	16,1 ± 0,3	0,677 ± 0,004	5,8 ± 0,1
890	527 ± 3	14,3 ± 0,7	0,680 ± 0,016	5,1 ± 0,3

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo  $C_B$  - Difusão de boro a 900 °C

$C_{B2}$  - Concentração de boro 0,1 %

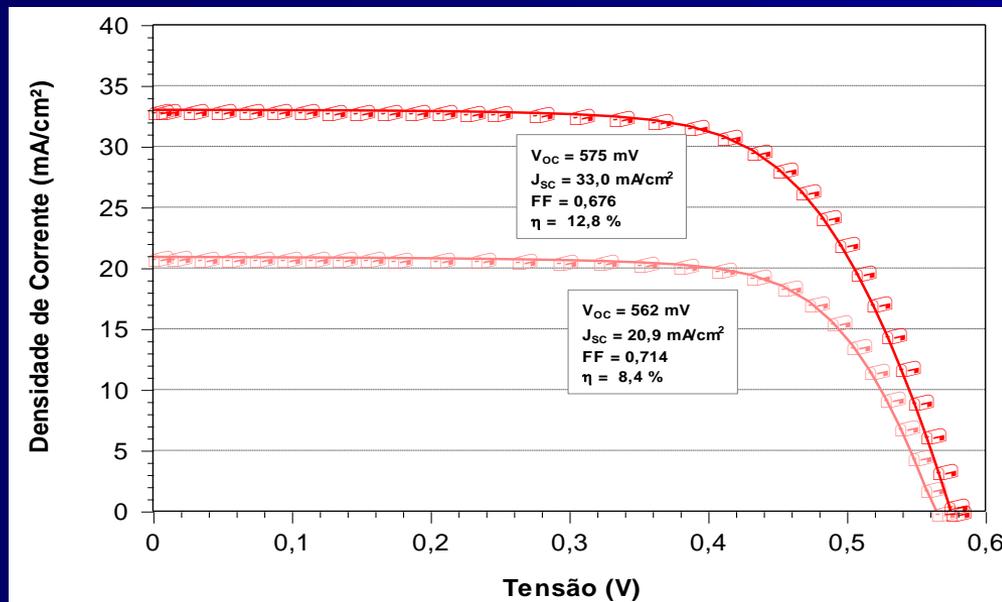
FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc mA/cm <sup>2</sup>	FF	$\eta$ (%)
840	547 ± 8	31,3 ± 0,5	0,644 ± 0,004	11,0 ± 0,4
850	544 ± 7	29,6 ± 2,9	0,616 ± 0,002	9,9 ± 0,9
860	550 ± 30	31,9 ± 2,0	0,59 ± 0,12	11,0 ± 3,0
870	530 ± 30	30,5 ± 1,8	0,56 ± 0,11	9,3 ± 2,5
FACE POSTERIOR				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
840	518 ± 14	11,2 ± 1,2	0,68 ± 0,05	4,0 ± 0,8
850	511 ± 20	11 ± 5	0,62 ± 0,05	3,7 ± 1,8
860	460 ± 170	13 ± 8	0,61 ± 0,17	5,0 ± 3,0
870	440 ± 180	9 ± 5	0,590 ± 0,140	2,8 ± 2,1

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo  $C_B$  - Difusão de boro a  $900\text{ }^\circ\text{C}$

$C_{B2}$  - Concentração de boro  $0,1\%$



**CURVA  $J_{sc}$ -  $V_{oc}$  DA CÉLULA SOLAR BIFACIAL DE MELHOR EFICIÊNCIA COM DOPANTE  $BBr_3$**

# 10. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS C

## PROCESSOS C: $BBr_3$

Processo **C<sub>B</sub>** - Difusão de boro a 900 °C

**C<sub>B3</sub>** - Concentração de boro 0,15 %

FACE FRONTAL				
$T_q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
850	541 ± 10	30,9 ± 1,2	0,627 ± 0,011	10,5 ± 0,7
860	536 ± 8	30,6 ± 0,8	0,596 ± 0,016	9,8 ± 0,6
870	536 ± 6	30,0 ± 0,7	0,605 ± 0,008	9,7 ± 0,5
880	530	29,5	0,565	8,9
FACE POSTERIOR				
$T_q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
850	506 ± 24	10 ± 6	0,69 ± 0,03	3,4 ± 2,1
860	498 ± 25	9 ± 5	0,640 ± 0,05	2,9 ± 1,7
870	502 ± 14	8,2 ± 2,5	0,687 ± 0,004	2,8 ± 0,9
880	484	5,1	0,712	1,8

# 11. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pp^+$

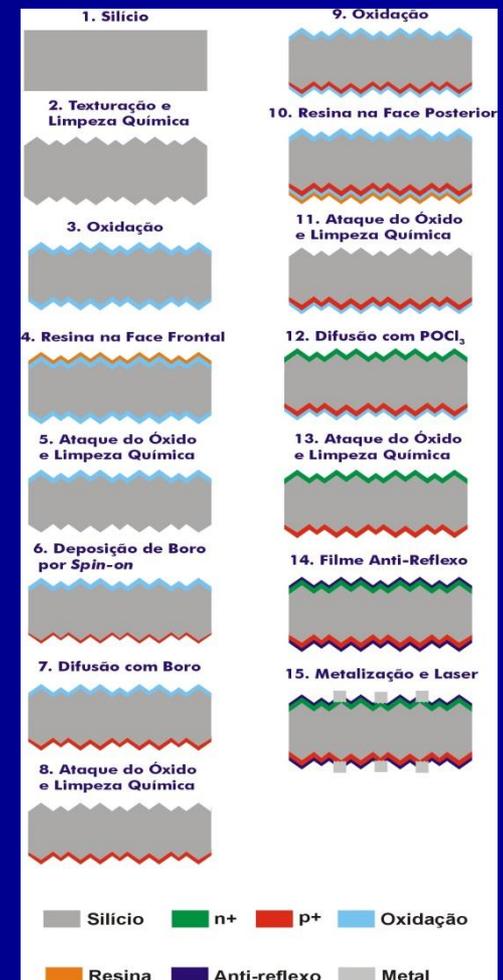
## PROCESSOS D: PBF20

**Processo DA-** Influência da oxidação para a proteção do emissor.

**DA1-** Resultados obtidos na caracterização de células solares bifaciais **com** o processo de oxidação após difusão de boro.

**DA2-** Resultados obtidos na caracterização de células solares bifaciais **sem** o processo de oxidação após difusão de boro.

ESQUEMA DO PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM O DOPANTE PBF20 PARA FORMAR A REGIÃO  $P^+$



# 11. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pp^+$

## PROCESSOS D: PBF20

Processo **D<sub>B</sub>**- Difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico

PROCESSO COM SUPRESSÃO DE ETAPAS E QUEIMA COM DUAS TEMPERATURAS DIFERENTES.



# 11. PROCESSOS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS COM ESTRUTURA $n^+pp^+$

## PROCESSOS D: PBF20

**Processo Dc-** Influência da espessura do dopante na eficiência da célula.

**Dc1-** Comparação entre células solares com uma camada de dopante e com duas camadas de dopante.

**Dc2-** Análise da posição da célula no processo de secagem do dopante dentro da estufa.

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF20

**Processo DA-** Influência da oxidação para a proteção do emissor

**DA1-** Resultados obtidos na caracterização de células solares bifaciais **com** o processo de oxidação após difusão de boro.

FACE FRONTAL				
Células	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
A1-28/10/08	576	34,3	0,676	13,4
A2-28/10/08	551	33,4	0,620	11,4
A3-28/10/08	550	33,4	0,595	11,0
A4-28/10/08	573	34,9	0,645	12,9
Média	563 ± 14	34,0 ± 0,7	0,63 ± 0,03	12,1 ± 1,2
FACE POSTERIOR				
A1-28/10/08	566	24,0	0,690	9,4
A2-28/10/08	529	19,3	0,602	6,1
A3-28/10/08	522	18,4	0,563	5,4
A4-28/10/08	558	23,6	0,653	8,6
Média	544 ± 22	21,3 ± 2,9	0,63 ± 0,06	7,4 ± 1,9

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF20

**Processo DA-** Influência da oxidação para a proteção do emissor

**DA2-** Resultados obtidos na caracterização de células solares bifaciais **sem** o processo de oxidação após difusão de boro.

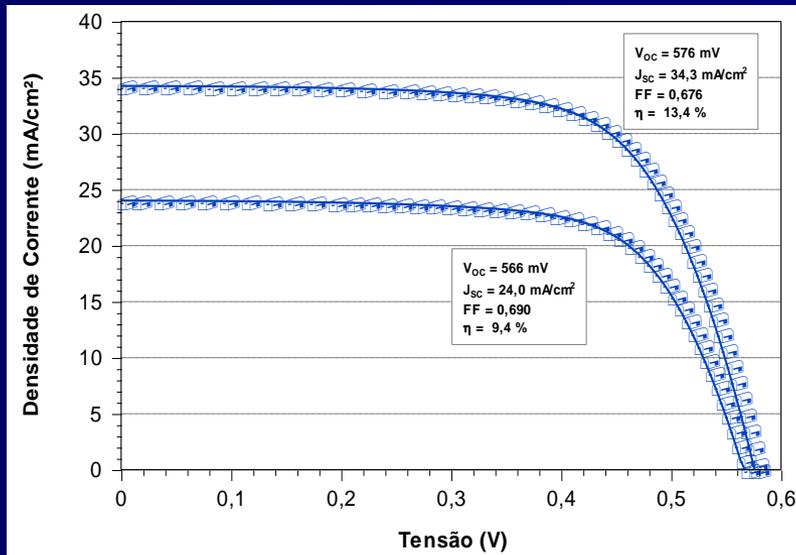
FACE FRONTAL				
Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
B1-28/10/08	565	29,0	0,616	10,1
B2-28/10/08	555	33,2	0,636	11,7
B3-28/10/08	567	33,5	0,681	13,0
Média	562 ± 6	31,9 ± 2,5	0,64 ± 0,03	11,6 ± 1,5
FACE POSTERIOR				
Célula	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
B1-28/10/08	551	20,2	0,614	6,8
B2-28/10/08	539	19,3	0,657	6,8
B3-28/10/08	553	20,9	0,708	8,2
Média	548 ± 8	20,1 ± 0,8	0,66 ± 0,05	7,3 ± 0,8

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

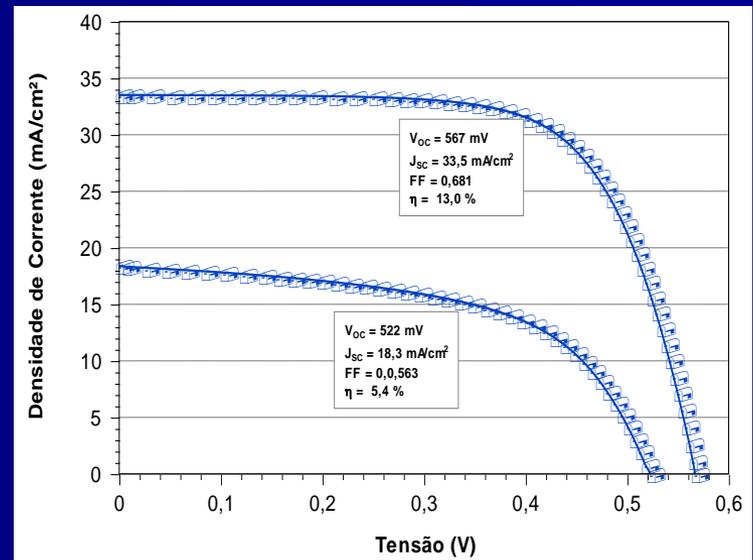
## PROCESSOS D: PBF20

### Processo DA- Influência da oxidação para a proteção do emissor

#### DA1- Célula **com** oxidação após difusão



#### DA2- Célula **sem** oxidação após difusão



CURVA  $J_{sc}$ - $V_{oc}$  MELHOR EFICIÊNCIA COM DOPANTE  
PBF20

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF20

**Processo D<sub>B</sub>**- Difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico.

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
850	580	34,5	0,691	13,8
	567	33,8	0,679	13,0
	568	33,9	0,659	12,7
	567	34,4	0,654	12,8
Média	570 ± 6	34,2 ± 0,4	0,671 ± 0,017	13,1 ± 0,5
FACE POSTERIOR				
850	565,41	21,6	0,728	8,9
	550,69	19,5	0,727	7,8
	554,11	20,4	0,702	7,9
	553,53	20,5	0,699	7,9
Média	556 ± 6	20,5 ± 0,9	0,714 ± 0,016	8,1 ± 0,5

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF 20

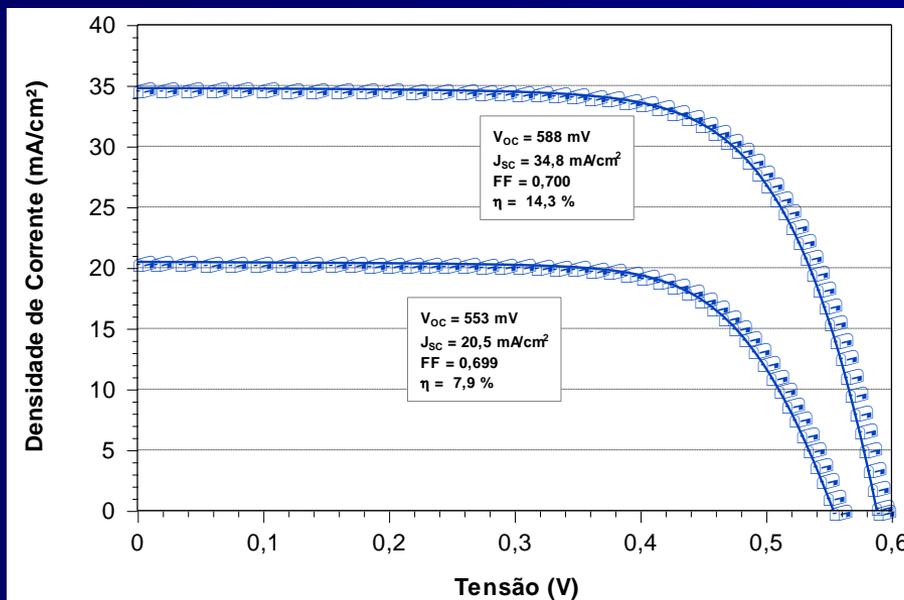
**Processo D<sub>B</sub>**- Difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico.

FACE FRONTAL				
$T_Q$ (°C)	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
860	574	34,8	0,683	13,6
	579	35,0	0,689	14,0
	574	35,1	0,678	13,7
	588	34,8	0,700	14,3
Média	579 ± 7	34,9 ± 0,2	0,687 ± 0,010	13,9 ± 0,3
FACE POSTERIOR				
860	561	20,9	0,708	8,3
	567	22,2	0,716	9,0
	563	23,6	0,705	9,4
	578	25,8	0,728	10,9
Média	567 ± 7	23,1 ± 2,1	0,714 ± 0,010	9,4 ± 1,1

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF 20

**Processo D<sub>B</sub>**- Difusão de boro e oxidação no mesmo processo térmico.



**Eficiência frontal: 14,3 %**

**Eficiência posterior: 10,9 %**

MELHOR CÉLULA BIFACIAL  
FABRICADA COM REDUÇÃO DE  
ETAPAS E DOPANTE **PBF20**

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF20

**Processo Dc-** Influência da espessura do dopante na eficiência da célula.

**Dc1-** Comparação entre células solares com uma camada e com duas camadas de dopante.

FACE FRONTAL				
Filme	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	$\eta$ (%)
Simples	571	33,1	0,546	10,3
	571	31,5	0,529	9,5
<b>Média</b>	<b>571 ± 1</b>	<b>32,3 ± 1,1</b>	<b>0,538 ± 0,012</b>	<b>9,9 ± 0,6</b>
Dupla	573	34,3	0,643	12,6
	574	34,9	0,657	13,2
<b>Média</b>	<b>573 ± 1</b>	<b>34,6 ± 0,4</b>	<b>0,650 ± 0,010</b>	<b>12,9 ± 0,4</b>
FACE POSTERIOR				
Simples	555	21,1	0,499	5,8
	555	20,9	0,496	5,7
<b>Média</b>	<b>555 ± 0</b>	<b>21,0 ± 0,2</b>	<b>0,498 ± 0,002</b>	<b>5,8 ± 0,1</b>
Dupla	564	24,5	0,661	9,1
	564	25,2	0,679	9,6
<b>Média</b>	<b>564 ± 0</b>	<b>24,8 ± 0,5</b>	<b>0,670 ± 0,013</b>	<b>9,4 ± 0,4</b>

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF 20

**Processo Dc-** Influência da espessura do dopante na eficiência da célula.

**Dc2-** Análise da posição da célula no processo de secagem do dopante PBF20 dentro da estufa.

FACE FRONTAL					
Filme	Secagem	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
Simples	Vertical	571	33,1	0,546	10,3
		571	31,5	0,529	9,5
	Média	571 ± 1	32,3 ± 1,1	0,538 ± 0,012	9,9 ± 0,6
	Horizontal	572	32,7	0,590	11,0
		572	34,4	0,665	13,1
	Média	572 ± 0	33,6 ± 1,2	0,63 ± 0,05	12,1 ± 1,5
FACE POSTERIOR					
Simples	Vertical	555	21,1	0,499	5,8
		555	20,9	0,496	5,7
	Média	555 ± 0	21,0 ± 0,2	0,498 ± 0,02	5,8 ± 0,1
	Horizontal	558	21,4	0,571	6,8
		558	21,3	0,693	8,3
	Média	558 ± 0	21,4 ± 0,1	0,63 ± 0,09	7,5 ± 1,0

# 12. RESULTADOS OBTIDOS NOS PROCESSOS D

## PROCESSOS D: PBF 20

**Processo Dc-** Influência da espessura do dopante na eficiência da célula.

**Dc2-** Análise da posição da célula no processo de secagem do dopante PBF20 dentro da estufa.

FACE FRONTAL					
Filme	Secagem	Voc (mV)	Jsc (mA/cm <sup>2</sup> )	FF	η (%)
Duplo	Vertical	573	34,3	0,643	12,6
		574	34,9	0,657	13,2
	Média	573 ± 1	34,6 ± 0,4	0,650 ± 0,010	12,9 ± 0,4
	Horizontal	573	34,5	0,673	13,3
		558	33,3	0,613	11,4
	Média	565 ± 11	33,9 ± 0,8	0,64 ± 0,04	12,3 ± 1,3
FACE POSTERIOR					
Duplo	Vertical	564	24,5	0,661	9,1
		564	25,2	0,679	9,6
	Média	564 ± 0	24,8 ± 0,5	0,670 ± 0,013	9,4 ± 0,4
	Horizontal	565	24,6	0,695	9,6
		544	23,2	0,600	7,6
	Média	554 ± 15	23,9 ± 0,9	0,65 ± 0,07	8,6 ± 1,5

## 13. ANÁLISE E CONCLUSÕES

Para células solares com estrutura  $n^+pn^+$  sem a formação de BSF seletivo de Al, verificou-se que a deposição de Al/Ag na face posterior sobre ou sob o filme AR não afeta os resultados. A eficiência máxima alcançada foi de 6,1 % e 0,8 %.

Para células solares com a mesma estrutura com a formação de BSF seletivo de Al, verificou-se que a pasta de Al deve ser depositada diretamente sobre o substrato de Si. A melhor temperatura de queima das pastas de metalização e difusão de Al simultâneas foi de 880 °C. A melhor eficiência obtida foi de 11,5 % e 1,2 %.

Nas células solares com estrutura  $n^+pp^+$  a região posterior foi formada com boro. Nos processos obtidos a 1000 °C e  $BBr_3$  os valores encontrados para as concentrações 0,1 % e 0,07 % são similares, sendo que a melhor célula apresentou eficiência de 12,2 % e 5,4 % na concentração de 0,1% de dopante, também os parâmetros elétricos são mais uniformes com esta concentração.

## 13. ANÁLISE E CONCLUSÕES

Constatou-se que quanto a ordem de difusão, a célula de melhor eficiência 12,2 % e 5,4 %, ocorreu quando se difundiu fósforo antes do boro. A bifacialidade desta célula foi de 0,44 % ainda muito baixo.

Quando se difundiu primeiro boro a bifacialidade foi de 0,89 % porém a melhor célula resultou em eficiência de 9,3 % e 8,5 %.

Analisando os resultados das concentrações 0,07 %, 0,1 % e 0,15 % com difusão de  $\text{BBr}_3$  a 900 °C a melhor célula obteve 12,8 % e 8,4 % de eficiência em 0,1 % de dopante no ambiente.

Para as concentrações 0,07 % e 0,15 % a melhor temperatura de queima foi a 850 °C e para a concentração de 0,1 % pode-se produzir melhores células nas temperaturas de queima de 840 ° e 860 °C.

Com dopante PBF20 depositado por *spin-on* as médias encontradas 12,1 % e 7,4 % são similares as encontradas com  $\text{BBr}_3$  (12,8 % e 8,4 %). A melhor célula com PBF20 foi 13,4 % e 9,4 %, frontal e posterior respectivamente.

# 13. ANÁLISE E CONCLUSÕES

Os melhores valores de  $J_{sc}$  e  $V_{oc}$  na face frontal com PBF20 foram superiores aos obtidos na difusão de  $BBr_3$ .

A difusão de boro e oxidação no mesmo passo térmico obteve a melhor célula com eficiência de 14,3 % e 10,9 %. A melhor temperatura de queima de pasta metálica é de 860 °C, também os melhores valores de  $J_{sc}$ ,  $V_{oc}$  e FF.

A eficiência de todas as células deste processo foi superior a 13,6 % na face frontal. A eficiência média foi de 13,9 % e 9,4 %.

As células com um único filme de dopante atingiram melhores resultados quando secas em estufa na posição horizontal.

As células com duplo filme as médias são similares quanto a posição de secagem com uma leve tendência para a posição vertical.

## 13. ANÁLISE E CONCLUSÕES

Desta análise de processamento de células solares industriais em substratos de Si-Cz com 62 cm<sup>2</sup> de área, conclui-se que a formação da região p<sup>+</sup> com o dopante PBF20, depositado por *spin-on* e difusão em forno convencional possibilita a redução de passos térmicos, com difusão do boro e oxidação no mesmo processo térmico.

Com este processo, foram fabricadas as células bifaciais com maior eficiência, de 14,3 % e 10,9 %, para a face frontal e posterior. Este resultado é muito próximo ao melhor valor publicado para este tipo de metalização e substrato, cuja eficiência é de 14,6 % e 13 %.

# 13. SUGESTÕES DE CONTINUIDADE

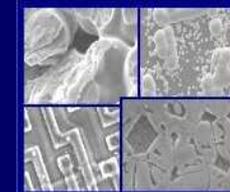
Como continuidade deste trabalho sugere-se otimizar as resistências de folha das regiões dopadas e da malha de metalização das regiões dopadas, por simulação e experimentalmente.

Também se sugere a otimização experimental da passivação das superfícies, principalmente da região  $p^+$ .

Outro ponto a ser estudado é a redução de passos térmicos para reduzir o custo do processo bem como desenvolver um processo para substratos de Si-FZ. As lâminas tipo n de Si-FZ são de melhor qualidade, com potencial de obter células solares de alta eficiência. Portanto, para a estrutura  $n^+np^+$  será desenvolvido o processo completo, com foco na otimização das regiões dopadas e na passivação das superfícies.



**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DO RIO GRANDE DO SUL**  
**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E TECNOLOGIA**  
**DE MATERIAIS**  
Faculdade de Engenharia,  
Faculdade de Física  
Faculdade de Química



**PGETEMA**

# **DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS INDUSTRIAIS DE FABRICAÇÃO DE CÉLULAS SOLARES BIFACIAIS EM SILÍCIO CZ**

**Rita de Cássia da Costa**

Licenciada em Física

**Orientadora: Profa. Dra. Izete Zanenco**

**Co-orientador: Prof. Dr. Adriano Moehlecke**

**Dissertação de Mestrado submetida ao Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia e Tecnologia de Materiais da PUCRS**